

Tuomas Teräsvuori

Venymäliuska-voima-anturin kehittäminen tuulitunnelikäyttöön

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinöörityö

3.6.2013

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Tuomas Teräsvuori Venymäliuska voima-anturin kehittäminen tuulitunnelikäyttöön 54 sivua + 7 liitettä 28.5.2013
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Energia- ja ympäristötekniikka
Ohjaaja	Laboratorioinsinööri Tomi Hämäläinen
<p>Tämän insinöörityön tavoitteena oli suunnitella, kehittää ja valmistaa venymäliuskavoima-anturi Metropolia ammattikorkeakoulun energiatekniikkalaboratorion tuulitunnelimittauksiin. Voima-anturin kehittämisessä otettiin huomioon materiaalien, venymäliuskojen ja rakenteiden ominaisuudet. Kehitetyn voima-anturin todentaminen tehtiin tuulitunnelimittauksilla, jolloin saavutettiin riittävän pieni ja tasainen voima, joka mitattiin ja on laskennallisesti todennettavissa.</p> <p>Voima-anturiprototyypin lineaarisuutta ja toimivuutta mitattiin tuulitunnelissa kalibrointimittauksilla. Tuulitunnelimittauksissa todettiin kehitetyn voima-anturin herkkyys sekä mitattiin virtausvastusvoimaa. Kaikissa tuulitunnelimittauksissa käytettiin ainoastaan yhdenlaista kappaletta, jonka muoto oli pyöreä ohut levy. Samalla kappaleella tehtiin vertailuanturille samanlaiset mittaukset.</p> <p>Tulosten vertailuosuudessa verrattiin laskennallisten ja voima-antureilla mitattujen virtausvastusvoimien arvoja. Tuloksissa vertaillaan ostetun voima-anturin ja kehitetyn voima-anturin ominaisuuksia, herkkyyksiä ja suorituskkyä. Suorituskyvyssä huomioitiin myös voima-anturien palautumista sekä maksimivoimaa.</p> <p>Tutkimuksissa mitatut virtausvastusvoimat voima-antureilla sekä lasketut ja simuloidut virtausvastusvoimat poikkesivat toisistaan noin 3,3 %. Molempien voima-antureiden mitatut virtausvastusvoimat poikkesivat 3,5 %, sekä anturien herkkyydet poikkesivat toisistaan 26,4 %.</p>	
Avainsanat	venymäliuska, tuulitunneli, mittauksia, voima-anturi

Author Title	Tuomas Teräsvoori Development of a Strain Gage Force Transducer for Wind Tunnel Measurements
Number of Pages Date	54 pages + 7 appendices 28 May 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Specialisation option	Energy and Environmental Engineering
Instructor	Tomi Hämäläinen, Lecturer
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to develop, design and construct a strain gage force transducer for the wind tunnel in the energy technology laboratory at the Metropolia University of Applied Sciences. In the development process of the force transducer we took into account material properties, machining processes, strain gages and structural properties. The verification of the developed force transducer was accomplished throughout the wind tunnel testing, whereby a sufficiently small and uniform drag force was measured, which can be computationally verified.</p> <p>In the theory section of this thesis the basic concepts of materials, elongation and force transducers are summarized.</p> <p>In the experimental section, measurements were carried out using wind tunnel and calibration measurements, with which the linearity of the force transducer was determined. Wind tunnel measurements were made in order to verify the sensitivity and measure drag forces with the developed force transducer. All of the wind tunnel measurements were made using a circular shaped object. Reference wind tunnel measurements were made with the same object using the Futek force transducer.</p> <p>In the results comparison section we compared calculation, simulation and measured drag force results. We compared the specifications, sensitivity and performance between the Futek built and the developed force transducer. In the performance we took into account the zero point restoration and stiffness of the transducers.</p> <p>In the studies the measured drag force from the force transducers and those results from calculation and simulation differed from each other approximately 3,3 %. The measured drag force between both force transducers differed 3,5 %, and the sensitivity differed 26,4 %</p>	
Keywords	strain gage, wind tunnel, measurements, transducer

Sisällys

Symboliluettelo

1	Johdanto	1
2	Teoria	1
2.1	Reynoldsin luku	1
2.2	Virtausvastusvoima	2
2.3	Hooken laki	3
2.4	Suhteellinen venymä	4
2.5	Mekaaninen hystereesi	4
2.6	von Mises yhdistettyjännitys	5
3	Voiman määrittäminen virtausvastusvoimalla	6
4	Voima-anturiprototyyppi	7
5	Voima-anturiprototyypin suunnittelu	8
5.1	Venymäliuskan toimintayhteenveto	8
5.2	Venymäliuskan valintaperusteet	8
5.3	Wheatstonen silta	9
5.3.1	Lämpötilakompensointi	10
5.4	Voima-anturiprototyypin rakenne	11
5.5	Prototyypin muotoilu	13
5.6	Lujuuskestävyyden tarkastelu	13
5.7	Voima-anturi prototyypin mittauskalvo	17
6	Kalvojen valmistus	18

7	Voima-anturiprototyypin mittausvirheiden arviointi	20
7.1	Systemaattiset virheet	20
7.2	Satunnaiset virheet	22
8	Mittausjärjestelyt	24
9	Mittaustulokset	25
9.1	Kalibrointimittaukset	25
9.2	Virtausvastusvoiman mittaukset	28
9.3	Nollapisteen siirtymisen mittaukset	29
10	Mittauksien havainnot ja tehdyt muutokset	30
10.1	Mitatun signaalin vaeltaminen	30
10.2	Kappaleen värähtely mitattaessa Futek LSB200-voima-anturilla	32
10.3	Voima-anturiprototyypin kaapelien ominaisvastuksien vaikutus	34
10.4	Voima-anturin mitatun signaalin muutos ajan funktiona.	36
10.5	Voima-anturin mittakalvon hajoaminen kalibrointimittauksien aikana	37
11	Voima-anturin kustannusten arviointi	39
12	Voima-anturien vertailu	43
12.1	Mittaustuloksien vertailu	43
12.2	Hystereesien vertailu	44
12.3	Tukevuuksien vertailu	46
12.4	Rakenteiden vertailu	47
12.5	Hintavertailu	48
13	Jatkotoimenpiteet	48
14	Yhteenveto	52

Liitteet

Liite 1. Teoreettinen virtausvastusvoima

Liite 2. Tekniset tiedot sekä kalibrintipöytäkirja Futek LSB 200 voima-anturille

Liite 3. Käytettyjen HBM venymäliuskojen tekniset ja valmistuserän tiedot

Liite 4. Käytettyjen HBM vastuskompensointi liuskojen tekniset ja valmistuserän tiedot

Liite 5. Futek LSB 200 voima-anturin mittauspöytäkirja

Liite 6. Futek LSB 200 mitattujen virtausvastusvoimien yhdistäminen

Liite 7. Prototyyppi voima-anturin kalibrointi ja mittauspöytäkirjat

Symboliluettelo

A	Kappaleen piiri	[m]
$C_{v,kitka}$	Kitkavastuskerroin	[1]
$C_{v,paine}$	Painevastuskerroin	[1]
d	Etäisyys venymäliuskan keskipisteestä mittakalvon pintaan	[m]
D_h	Hydraulinen halkaisija	[m]
$e_{s,b}$	Venymäliuskan poikkeaman systemaattinen virhe	[%]
$e_{s,u}$	Systemaattiset virheet	[%]
E	Kimmokerroin	[GPa]
f	Pyörteiden irtoamistaajuus	[Hz]
F	Voima	[N]
$F_{v,kitka}$	Kitkavastusvoima	[N]
$F_{v,paine}$	Painevastusvoima	[N]
h	Mittakalvon nivelkohdan paksuus	[m]
k	Liuskavakio	[1]
k	Jousivakio	[N/m]
l	Venytetyn kappaleen pituus	[m]
L	Pituus	[m]
L	Kappaleen karakteristinen pituus	[m]
L_1	Pidemmän kaapelin pituus	[m]
L_2	Lyhyemmän kaapelin pituus	[m]
n	Mittauksien määrä	[1]
n_1	Kaapelien määrä venymäliuska ennen uudelleen kytkentää	[1]
n_2	Kaapelien määrä venymäliuska uudelleen kytkennän jälkeen	[1]
P	Teho	[W]
R	Kaapelin ominaisvastus metrin pituutta kohti	[Ω /m]
Re	Reynoldsin luku	[1]
R_L	Kaapelin vastus	[Ω]
R_{SG}	Venymäliuskan ominaisvastus	[Ω]
R_{TN1}	Lämpölaajenemisvastuksen säätö	[Ω]
s	Keskihajonta	[%]
Sr	Strouhalin luku	[1]
T	Lämpötila	[°C]
TK_{TN1}	Lämpölaajenemiskerroin	[1/K]
U_A	Ulostulojännite	[mV]
U_B	Syöttöjännite	[V]

v	Virtausnopeus nopeus	[m/s]
v	Keskihajonta prosentteina	[%]
V_o	Mitattu jännite	[mV]
V_s	Syöttöjännite	[V]
w_∞	Lähestymisnopeus	[m/s]
x	Jousen siirtymä	[m]
x_n	Mitatut tulokset	[1]
\bar{x}	Aritmeettinen keskiarvo	[1]
ΔL	Jännityksen aiheuttama pituuden muutos	[m]
ΔR	Vastuksen muutos	[Ω]
ΔR_L	Kaapelin vastuksen muutos	[Ω]
ε	Suhteellinen venymä	[$\mu\text{m}/\text{m}$]
ε_n	Wheatstonen sillan venymäliuskan suhteellinen venymä	[$\mu\text{m}/\text{m}$]
σ	Veto- tai taivutusjännitykset	[MPa]
ρ	Tiheys	[kg/m^3]
τ	Leikkausjännitys	[MPa]
μ	Dynaaminen viskositeetti	[Pa·s]

1 Johdanto

Insinööriyön tavoitteena oli suunnitella, kehittää ja valmistaa venymäliuskoihin perustuva voima-anturi staattiseen voiman mittaamiseen. Insinööriyö tehtiin Metropolia Ammattikorkeakoulun energiatekniikan laboratoriossa olevaan tuulitunneliin.

Työ toteutettiin kolmessa osassa. Ensimmäinen osa käsittelee kirjallisuustutkimuksen kautta virtausta, venymäliuskoja, Hooken lakia sekä yleisesti materiaaliominaisuuksia kuten suhteellinen venymä, hystereesiä sekä vertailujännityksiä. Toinen osa käsittelee voima-anturiprototyypin suunnittelua, rakenteellista todentamista, osien valmistamista ja valmistamiseen liittyviä ongelmia. Kolmannessa ja viimeisessä osassa käsiteltiin mittaukset ja voima-anturiprototyypin verifiointin, ja validointia.

2 Teoria

2.1 Reynoldsin luku

Virtauksen luonnetta kuvaava Reynoldsin luku on dimensioton suure. Se kuvaa Newtonilaisten nesteiden virtausten luonnetta. Reynoldsin luvun avulla voidaan määrittää onko virtaus laminaarista vai turbulentsia. Reynoldsin luvulla voidaan laskea teoreettisen virtauksen aiheuttamaa virtausvastusvoimaa [3, s.85; 11, s.25]. Reynoldsin luku on

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} = \frac{\rho \cdot v \cdot D_h}{\mu} \quad (1)$$

Re	Reynoldsin luku
ρ	välinaineentiheys, riippuu virtaavan nesteen lämpötilasta
v	väliaineen virtausnopeus
L	kappaleen karakteristinen pituus
μ	virtaavan väliaineen viskositeetti

Kappaleen vaikutus Reynoldsin luvussa kuvataan karakteristisella pituudella. Se voi olla esimerkiksi kappaleen paksuus tai hydraulinen halkaisija. Hydraulinen halkaisija kuvaa kappaleen pinta-alaa suhteessa tämän kappaleenpiiriin [3, s.85]. Hydraulinen halkaisija on

$$D_h = \frac{4 \cdot A}{P} \quad (2)$$

D_h	hydraulinen halkaisija
A	kappaleen virtauksen suuntainen pinta-ala
P	kappaleen ympärysmitta

2.2 Virtausvastusvoima

Virtauksessa olevaan kappaleeseen kohdistuu voima, joka koostuu kitkavastusvoiman ja painevastusvoiman yhteisvaikutuksesta. Kokonaisvastusvoima on kitka- ja painevastusvoiman summa ja se voidaan kaavana esittää [3, s.150]

$$F_v = F_{v,kitka} + F_{v,paine} \quad (4)$$

$F_{v,kitka}$	kitkavastusvoima
$F_{v,paine}$	painevastusvoima

Kitkavastusvoima esiintyy virtauksessa olevan kappaleen pinnoilla, jotka ovat samansuuntaisia kuin virtaus. Kitkavastuskerroin muuttuu Reynoldsin luvun suhteen aina, kun virtauksen suuntaiset pinnan epätasaisuudet ovat pienempiä kuin muodostuvan rajakerroksen paksuus. Kitkavoima on [3, s.150]

$$F_{v,kitka} = C_{v,kitka} \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (5)$$

$C_{v,kitka}$	kitkavastuskerroin
A	virtauksen suuntainen pinta-ala

Painevastusvoima esiintyy taas virtauksessa olevan kappaleen pinnoilla, jotka ovat kohtisuoria virtaukseen nähden. Virtausvastusvoima on [3, s.150]

$$F_{v,paine} = C_{v,paine} \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (6)$$

$C_{v,paine}$	painevastuskerroin
A	virtausta kohtisuoraan oleva pinta-ala

Virtauksessa olevan kappaleen muoto vaikuttaa kitkavastusvoiman ja painevastusvoiman suhteeseen. Silloin kun kappaleen paksuus on suuri verrattuna tämän pinta-alaan, on painevastusvoima suurempi, mutta jos kappaleen paksuus on pienempi verrattuna kappaleen virtauksen kohtisuoraa olevaan pinta-alaan, on kitkavastusvoima suurempi.

2.3 Hooken laki

Hooken laki kuvaa materiaalin elastista käyttäytymistä voimien vaikutuksesta. Materiaalit venyvät voimien vaikutuksesta. Hooken laki kuvaa voiman aiheuttaman venymän, ja se voidaan yksinkertaisesti esittää kaavassa 9.[7, s.302]

$$F = -k \cdot x \quad (7)$$

F	voima
k	jousivakio
x	jousen siirtymä

Materiaalit voidaan käsitellä elastisina, kuin myötörajaa ei ole ylitetty. Myötörajan ylityttyä materiaalit käyttäytyvät epälineaarisesti, ja niihin ilmenee pysyviä muodonmuutoksia jotka voivat aiheuttaa työstökarkenemistä. Työstökarkeneminen toisien sanojen on materiaali osittainen kovettuma, jonka käyttäytyminen on erilainen kuin alkuperäinen materiaali.

Kaavasta 7 voidaan tällöin soveltaa materiaalille kaavaa 8, jossa esitetään materiaalin elastinen venyminen jännityksen ja kimmokertoimen funktiona.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \rightarrow \varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (8)$$

σ	jännitys
E	kimmokerroin
ε	suhteellinen venymä

2.4 Suhteellinen venymä

Suhteellinen venymä esitetään voimasta tai lämpötilan muutoksesta johtuvana erään sekktion siirtymänä alkuperäisen mitan suhteen. Suhteellinen venymä kuvaa pituuden muutosta mikrometrissä jokaista pituus metriä kohti [4, s.17]. Kimmokertoimen edellyttää kertoimella kuvattavan materiaalin käyttäytyvän lineaarisesti.

Suhteellisella venymällä voidaan määrittää kimmokertoimen avulla kappaleessa oleva jännitys, edellyttäen että materiaali käyttäytyy elastisesti. Venymän avulla on mahdollista käänteisesti laskea kimmokerroin, silloin kun kappaleessa oleva jännitys on tiedossa. Suhteellinen venymä on

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{l-l}{L} \quad (9)$$

ΔL	Jännityksen aiheuttama pituuden muutos
L	Alkuperäinen pituus
l	Venytetyn kappaleen pituus

2.5 Mekaaninen hystereesi

Mekaaninen hystereesi on mitattavan venymän ero kuormattaessa ja kuormaa poistettaessa. Voima-anturien mekaaniseen hystereesiin vaikuttavat venymäliuskat, sekä mahdollisesti näiden liimaus ja voima-anturin komponentit, joihin venymäliuskat on liimattu. Kokemuksien mukaan mekaaninen hystereesi pienenee mittaus sarjojen aikana, jolloin on tärkeää tarkastella ensimmäisen ja viimeisen mittauksen eroa [4, s.87].

Mekaanista hystereesiä voidaan vähentää valitsemalla venymäliuska, jossa on pitkä mitta-alue, myös materiaalin sisäisellä kitkalla on suuri vaikuttaja hystereesiin. Esimerkiksi alumiinilla on hyvin pieni sisäinen kitka, jolloin hystereesi on pienempi kuin vastaavanlaisessa teräksisessä rakenteessa.

2.6 von Mises yhdistettyjännitys

von Mises jännitykset (myös kutsutaan vertailujännitykseksi), on kaikkien voimien aiheuttamien jännityksien yhteisvaikutuskaava. Kimmoteorian mukaisessa mitoituksessa käytetään von Mises yhteisvaikutuskaavaa kriittisen pisteen tarkasteluun [2, s.48]. von Mises yhdistettyjännitys lasketaan [3, s.179]

$$\sigma_{vert}^2 = \frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \quad (13)$$

σ_{vert}	von Misesin yhdistetty jännitys
σ	veto ja/tai taivutusjännitykset eri koordinaatiston akselien mukaan
τ	leikkausjännitys eri leikkaustasoissa

Yhdistettyjännitystä hyödynnetään lujoustarkasteluohjelmissa, sillä kaikki jännitykset yhdistetään verkon solmupisteissä ja tarkastellaan jännityksien yhteisvaikutusta kyseisessä pisteessä.

3 Voiman määrittäminen virtausvastusvoimalla

Voima-anturin mittausalueen määrittäminen valittiin suurimman teoreettisen virtausvastusvoiman avulla. Suurinta virtausvastusvoimaa tarkasteltiin pyöreään levyäiseen kappaleeseen, sekä tuulitunnelin virtausnopeuksien avulla. Energiatekniikan laboratorion tuulitunnelin ominaisuudet ovat esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Tuulitunnelin ominaisuudet.

Tuulitunnelityyppi:	suljettu virtaus tuulitunneli
Virtausnopeus [m/s]:	0..42m/s (piennopeustuulitunneli)
Mittausalue (leveys x pituus x korkeus) [mm]:	500 mm x 1140 mm x 400 mm
Ohjausjärjestelmä:	Labview GUI (Grafical User Interface) National Instruments (Hardware)

Virtausvastusvoimien laskennoissa käytettiin taulukon 2 mukaisia ilman ominaisuuksia, sekä oletettiin ilman lämpötilan pysyvän tasaisena, jolloin ominaisuuksien muu. Voiman laskennoissa käytettiin kirjallisuudesta hyväksyttyä virtausvastuskerrointa lieriölle, jonka arvo on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 2. Laskennoissa käytetyt ilman ominaisuudet [6, s.860].

Ilman Lämpötila [°C]:	20 °C
Ilman tiheys [kg/m³]:	1,2 kg/m ³
Kinemaattinen viskositeetti [m²/s]:	1,5 x 10 ⁻⁵ m ² /s
Dynaaminen viskositeetti [kg/m s]:	1,8 x 10 ⁻⁵ kg/m s

Taulukko 3. Virtausvastuskerrointen vertailu kirjallisuudesta [3, s.260; 11, s.485].

Kirjailija	Teos	Virtausvastuskerroin
Willi Bohl	Teknillinen virtausoppi	1,17
Frank M. White	Fluid mechanics, 5th edition	1,17 kun $Re > 10^4$

Suurimman sallitun virtausnopeuden aiheuttama virtausvastusvoima on 19,9 N. Liitteessä 1 on esitelty virtausvastusvoiman laskennat joiden avulla voima-anturiprototyypin rakenne todetaan sekä virtausvastusvoiman kuvaaja. Mitattavan kappaleen kitkavastusvoima oli niin pieni, että tämän tarkastelu jätettiin huomioimatta.

4 Voima-anturiprototyyppi

Voima-anturin prototyypeissä käytettiin alumiinia sekä ruostumatonta terästä. Alumiinia käytettiin anturin ulkokuoren muotoilussa ja mittauskalvoissa, ruostumatonta terästä muissa rakenteellisissa kohteissa, kuten anturin pitimessä sekä kalvojen välissä olevassa akselissa kestävyys ja käytettävyyden vuoksi. Ruostumattomasta teräksestä tehtyjen kierteiden kestävyys on huomattavasti suurempi kuin alumiinista tehty kierreteet, sekä ruostumattomasta teräksestä tehty kierreteet eivät hapetu tai ruostu eikä myöskään synny alumiinin välissä galvaanista sidosta (korroosio), jolloin kierteiden irrottaminen on vaivatonta.

Alumiinia käytetään prototyyppien tekemiseen, koska se on helposti koneistettava materiaali. Anturin akseli tehtiin ruostumattomasta teräksestä jotta alumiinin ja teräsrakenteiden välille ei syntyisi galvaanista sähköparia

Massatuotannossa olevien voima-antureiden rungot eivät ole yleensä tehtyjä alumiinista, johtuen sen vähäisestä pinnan kovuudesta, kestävydestä sekä hinnasta. Prototyyppeihin alumiini soveltuu mainiosti, sillä ainevahvuudet voivat alumiinilla olla suurempia kuin teräksellä, jolloin kalvojen koneistaminen onnistuu helpommin ja nopeammin.

Toinen oleellinen syy, miksi alumiinia harvoin käytetään voima-antureissa, on lämpölaajenemiskerroin. Tuulitunnelimittauksien aikana ei tapahdu merkittäviä lämpötilamuutoksia, jolloin tämä ei aiheuta mittavirheitä. Tätä mittavirhettä saa myös pienennettyä käyttämällä alumiinille soveltuvia venymäliuskoja sekä kompensoimalla lämpötilojen mukaan Wheatstonen sillan.

Voima-anturin pidin tehtiin ruostumattomasta teräksestä. Ruostumatonta terästä käytettiin hitsauksen helppouden vuoksi, koska alumiinin hitsaus on huomattavasti vaativampaa.

Valittu alumiini on terästä huomattavasti heikompaa (taulukko 4), jolloin voiman käyttö on rajoitettu. Alumiinin kimmokerroin on noin 71 GPa, kun vastaavasti teräksen kimmokerroin on 210 GPa. Pienempi kimmokerroin mahdollistaa sen, että pienemmällä voimalla saavutetaan suurempia jännityksiä, sekä venymiä.

Taulukko 4. Alumiinin ja teräksen ominaisuudet [2, s. 26 - 28].

	Alumiini EN-AW-6082-T6	Teräs SFS-EN S355J2G3
Kimmokerroin (E)	71 GPa	210 GPa [2]
Myötölujuus (fy)	260 MPa [1]	355 MPa [2]
Murtolujuus (fu)	310 MPa [1]	520 MPa [2]
Lämpölaajenemiskerroin (α) [4, s.31]	$23,8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	$12,0 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Kolmas oleellinen syy, miksi alumiinia käytettiin voima-anturiprototyypissä oli sen alhaisen sisäisestä kitkasta. Tämä alhainen sisäinen kitka määrittää miten materiaalin palautuu kuormituksen jälkeen. Alumiinin pieni sisäinen kitka tarkoittaa että se palautuu lähtötilanteeseen tehokkaasti, jolloin mekaaninen hystereesi olisi mahdollisen pieni.

5 Voima-anturiprototyypin suunnittelu

5.1 Venymäliuskan toimintayhteenvedo

Venymäliuska on anturi, jolla mitataan voimasta aiheutuva venymä kappaleessa. Venymäliuskan toiminta perustuu sisäisen metallijohtimen vastuksen muutokseen johtuen tämän venyttämisestä. Venytyksen aiheuttaman muodonmuutoksen johdosta myös venymäliuskan sisäinen vastus muuttuu, venymäliuskan vastuksen muutoksen aiheuttaa Wheatstonen sillan ulosjännitteen muutos. Venymäliuskoja kytketään Wheatstonen siltaan, tai käyttää yksinään [4, s, 2]

5.2 Venymäliuskan valintaperusteet

Voima-anturin prototyypin venymäliuskojen valintaperusteet olivat

- mahdollisimman laaja mittausalue,
- alumiinille tarkoitettu lämpötilakompensoitu venymäliuska,
- ominaisvastus sopivalla alueella,

Lopullisessa voima-anturissa valittiin käytettäväksi venymäliuskoja, joiden ominaisvastus on 350Ω . Venymäliuskat, joiden ominaisvastus on suurempi kuin 120Ω , saattavat toimia radioaaltojen vastaanottimina, jolloin on otettava huomioon sähkömagneettiset ilmiöt ja mahdollisesti suunniteltava suojausta voima-anturille. [4, s.51]

5.3 Wheatstonen silta

Voima-anturiprototyypissä käytetään Wheatstone täysilta kytkentää. Venymäliuskat sijoitettiin voima-anturin mittauskalvolle siten, että Wheatstonen sillan vastukset 1 ja 3 ovat anturissa, sekä vastukset 2 ja 4 ovat täydennysvastuksia, joiden funktio mittausketjussa on lämpötilan kompensointi, sekä Wheatstonen sillan täydennys. Kaavassa 12 [4, s.129] on esitetty Wheatstonen sillan kytkennän peruste.

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{4}k(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (12)$$

V_o	mitattu jännite
V_s	syöttöjännite
k	liuskavakio
ε_n	venymäliuskojen suhteelliset venymät

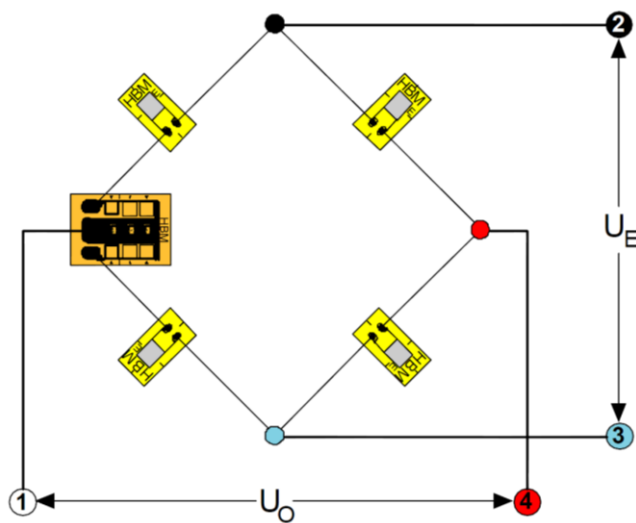
Wheatstonen sillan vastukset kytkettiin 1 ja 3 voima-anturin mittauskalvolle siten, että jokainen vastus koostui kahdesta 350Ω :n venymäliuskasta, jotka oli asennettu vastakkaisille puolille mittakalvoa ja kytketty sarjaan, jolloin yhden Wheatstonen sillan vastus oli noin 700Ω . Täydennysvastukset asennettiin erilliseen alumiinirunkoon, samoin kuin nollapisteen kompensointi ja ominaisvastuksen säädönliuskat. Täydennyssilta on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Wheatstone täydennyssillan runko.

Kuvassa 1 täydennyssillan rungon vasemmassa reunassa on terminaalit joihin voima-anturin venymäliuskojen kaapeli juotettiin, myös vasemmalla on nollapisteen ja ominaisvastuksen säätöliuskat. Oikealla ovat terminaalit, joista täydennyssillan kaapelit juotettiin ja kiinnitettiin mittalaitteeseen. Seuraavat oikealta vasemmalle ovat Wheatstonen sillan 2 ja 4 täydennysvastukset kytkettynä sarjaan.

Kuvassa 2 on esitetty täyden Wheatstonen sillan kytkentä, sekä nollapisteen säätöliuskan sijainti. Nollapistettä muutettiin mittaamalla U_E ja U_O vastuksen tuloksia, kuvassa näkyy myös kompensointiliuskan sijainti Wheatstone täysilta kytkennässä.



Kuva 2. Wheatstonen täysilta.[4, s.127]

5.3.1 Lämpötilakompensointi

Voima-anturiprototyyppiä käytetään tuulitunnelimittauksissa, missä ei tapahdu merkittäviä lämpötilan muutoksia. Voima-anturiprototyypin suunnittelussa huomioitiin lämpötilakompensointi niin, että anturi voidaan käyttää myös sellaisissa kohteissa missä lämpötila muuttuu [4, s. 61 - 67; 159 - 161].

Kaapelien lämpötilasta aiheutuva mittausrvirhe voidaan täysisiltakytkennästä vähentää tai poistaa kokonaan tekemällä 6 kaapelin järjestelmä [4, s.171], jossa kahdesta kaapelista mitataan sillan jännite, sekä syöttöjännitteen kaapeleihin liitetään kaksi jännitteen mittaускаapelia, jotka ovat samanpituiset sekä kulkevat samaa reittiä kuin syöttökaapelit.

Kuusikaapelin kytkennän hyödyt ovat, että jos kaapelien lämpötilat muuttuvat, myös vastukset muuttuvat. Tällöin jos syötetään tunnettu jännite syöttökaapeleilla ja mitataan vähemmän kuin syötetty jännite mittaускаapeleilla, voidaan tämän jännitteen häviö kompensoida [4, s.172].

Wheatstonen sillan lämpötilan kompensointi toteutetaan lämpötilankompensointiliuskalla, jonka liimausprosessi on samanlainen kuin venymäliuskan. Lämpötilakompensointiliuskan ominaisuuksiin kuuluu, että tavoitelämpötilan mukaan voidaan kasvattaa tämän vastusta, jolloin lämpötilan muutoksista aiheutuvat mittausjännitteen muutokset pysyvät mahdollisen alhaisina.

Voima-anturiprototyypissä lämpötilankompensointiliuskoja ei käytetty johtuen käyttöolosuhteista. Mittauksen aikana virtauksen lämpötilan oletettiin pysyvän vakiona, sekä laboratorion lämpötilaa myös ylläpidetään vakiona.

5.4 Voima-anturiprototyypin rakenne

Voima-anturiprototyypin rakenteen lähtökohdaksi otettiin tukevuuden hakeminen verrattuna samankaltaiseen S-muotoiseen anturiin sekä parantaa herkkyyttä, muotoilua ja rakenteen kokoa. Anturin rakenne suunniteltiin käytettiin CAD-ohjelmistoa (Computer Aided Design), jolla kyettiin tekemään myös elementtimukainen tarkastelu rakenteelle. Kummankin ohjelman iterointikierrokset menivät automaattisesti muuttaen oleellisia mittoja, kuten nivelkohtien etäisyyksiä ja paksuuksia. Prototyypivoima-anturi kuitenkin pyrittiin suunnittelemaan yhtä herkäksi, sekä tukevammaksi kuin perinteinen S-muotoinen voima-anturi.

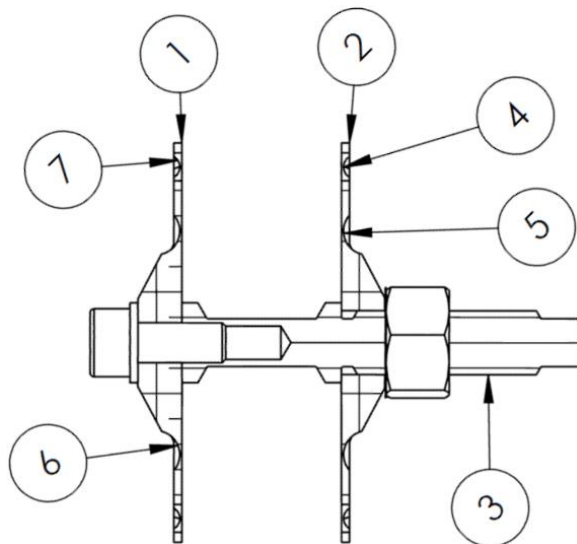
Perinteisen S-muotoisen voima-anturin runko mallinnettiin ja tehtiin lujoustarkastelu elementtimenetelmällä (Finite Element Analysis), jolloin määriteltiin tukevuuden määrä. Määritelty tukevuuden suuruus oli lähtökohtana voima-anturiprototyypin tukevuuden varmistamiseksi. Vaaka-asentoon laitettu S-mallisen voima-anturin vaikuttaa myös pystysuuntainen voima johtuen siihen kiinnitettävästä kappaleesta ja maanvetovoimasta.

Kuvassa 3 on esitetty periaatekuva voima-anturiprototyypin rakenteesta. Ensimmäinen kalvo vasemmalla on tukikalvo, ja oikealla on varsinainen mittakalvo. Molempien kalvojen läpi kulkee akseli, johon voidaan kiinnittää mitattava kappale. Akselin molem-

missä päissä on kierteet, siten että kalvot ja akseli kiristetään yhteen ja ne käyttäytyvät jäykkänä rakenteena.

Osaluettelo kuvasta 4 on esitetty seuraavasti:

1. Mittakalvo
2. Tukikalvo
3. Akseli
4. Tukikalvon ulompi nivel
5. Tukikalvon sisempi nivel
6. Mittakalvon sisempi nivel, kutsutaan myös mittanivel
7. Mittakalvon ulompi nivel



Kuva 3. voima-anturiprototyypin rakenteen periaatekuva.

Voima-anturiprototyypin ulkopuolinen muotoilu vaikuttaa sisäiseen rakenteeseen, koska muotoilua jouduttiin huomioimaan virtauksen takia, siten ettei se vaikuttaisi mitattavaan kappaleen virtaukseen. Voima-anturiprototyypin koko rajoittaa valittavien venymäliuskojen kokoa ja kalvojen nivelkohtien paksuutta.

Venymäliuska-voima-anturissa pyrittiin saavuttamaan nimellisvoima jonka signaali vastaa 2 mV/V signaalia silloin, kun voima-anturi kuormitetaan suurimmalla sallitulla voimalla. Voima-anturiprototyypin maksimivoima määritettiin olemaan virtausvastusvoiman verran, jolloin ylimääräisiä varmuuskertoimia ei otettu mukaan ja prototyypin herkkyys olisi mahdollisimman hyvä.

5.5 Prototyypin muotoilu

Voima-anturiprototyypin runkoa ja pidikettä suunniteltiin mahdollisen virtaviivaisiksi ja ei häiritsisi mitattavaa kappaletta vaikuttamatta esimerkiksi kappaleen taakse syntyvää painetta. Prototyypin muotoilua alustavasti mallinnettiin virtauslaskentaohjelmilla jonka avulla pyrittiin tarkastelleen virtausvastusvoima, sekä ilman virtausnopeutta kappaleen ympäri. Molemmista virtauslaskennoista verrattiin mitattavaan kappaleeseen kohdistuva virtausvastusvoima, tämän voiman vertailulla määritettiin vaikuttaako voima-anturin runko kappaleen virtaukseen.

Vapaan kappaleen virtaustarkastelussa huomataan, että mitattava kappale on liian suuri tuulitunneliin, sillä virtaus kappaleen ympärillä nopeutuu, jolloin tuulitunnelin seinämät vaikuttavat kappaleen virtaukseen. Todettiin virtauslaskennalla että voima-anturiprototyypin vaikutus virtausvastukseen on kohtalaisen pieni, jolloin pääteltiin että voima-anturin runko ei vaikuta kappaleen virtausvastukseen.

5.6 Lujuuskestävyyden tarkastelu

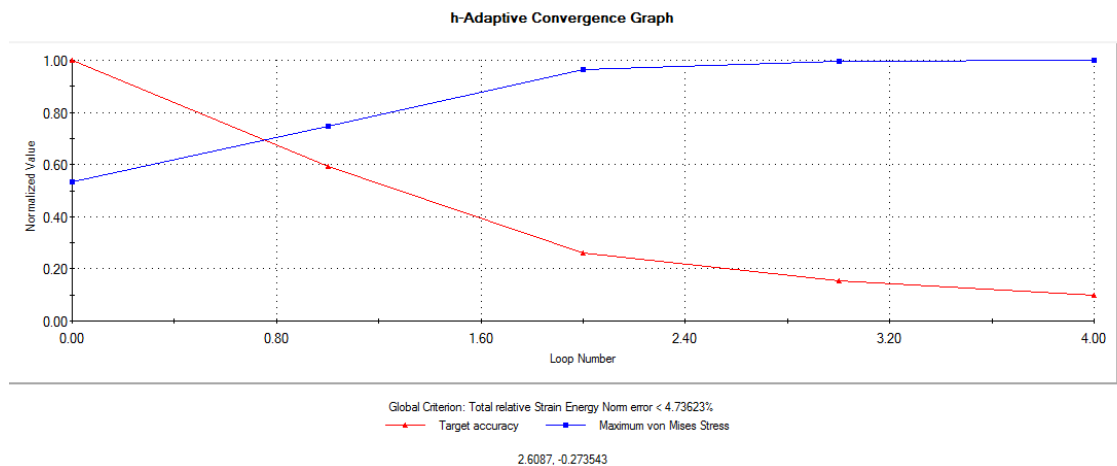
Voima-anturiprototyypin kestävyttä tarkasteltiin suurimmalla virtausvastusvoimalla mitä anturiin tullaan kohdistamaan. Tarkastelussa huomioitiin, ettei prototyypin materiaalien myötörajat ylity. Jos materiaalin jännitys nousee yli myötörajan, silloin tapahtuu pysyviä muodonmuutoksia ja pahimmassa tapauksessa materiaali voi murtua.

Taulukossa 5 on verkon ominaisuudet lujuuslaskennalle. SolidWorks Simulation H-adaptive on automaattiverkottaja. Verkottaja tihentää verkkoa siellä, missä integroitava funktio heilahtelee voimakkaimmin, jolloin tuloksista saadaan tarkempia.

Taulukko 5. Lujuuslaskennassa käytetyt reunaehdot.

Elementtien määrä:	185061
Solmujen määrä:	303501
Käytetty verkon adaptointi (verkon automaattinen tihentäminen):	SolidWorks Simulation H-adaptive
Iterointikierroksia:	4

Kuvassa 4 on esitetty sinisellä käyrällä lujuuslaskennan iterointitulosten kuvaaja, ja huomataan että 1.7 iterointikierroksen jälkeen käyrä alkaa lähestyä vaakasuoraa, jolloin von Missin yhdistetyn jännityksen muutos edellisestä iteroinnista ei ole huomattava. Toisin sanoen kun von Missin jännitykset eivät poikkea edelliseltä iterointikierrokselta, on saavutettu riittävän tiheä verkko, jolloin mahdollinen virhe pienenee. Kuvassa 4 punainen käyrä esittää laskentojen iterointikierrosten virheet.

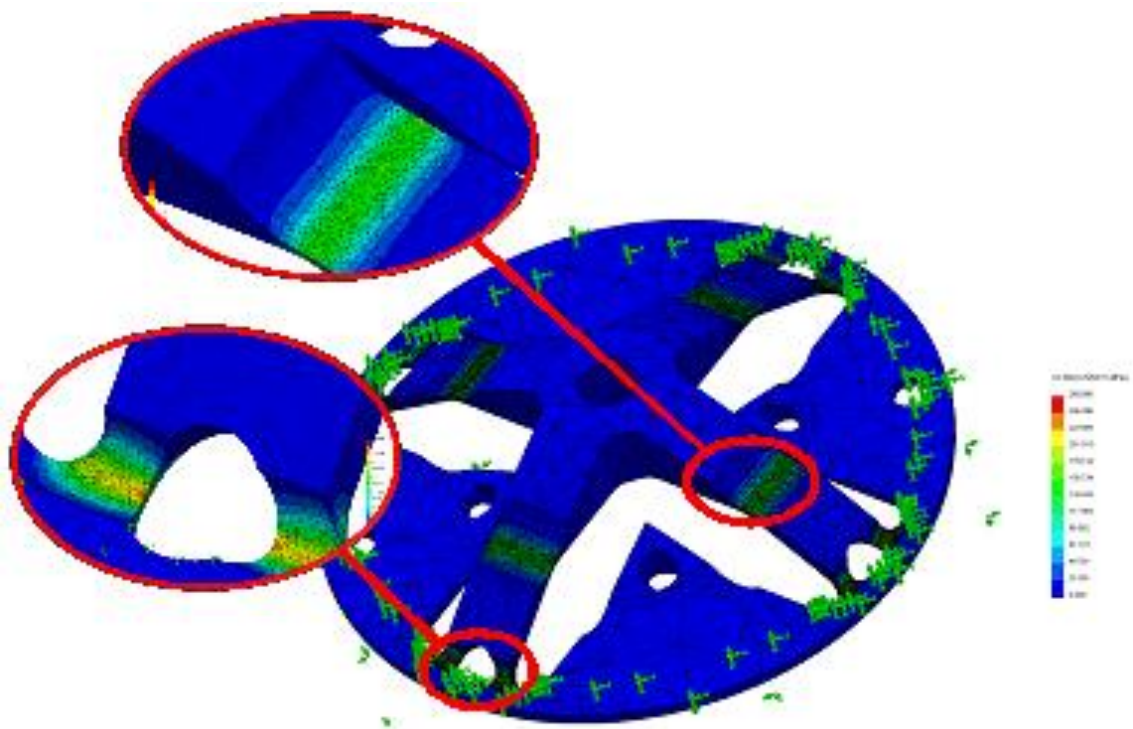


Kuva 4. Konvergenssin kuvaaja.

Lujuuskestävyyden tarkastelu tehtiin koko prototyypin rakenteelle, johon sisältyy molemmat kalvot, akseli ja välikappale. Kokoonpanon lujuustarkastelu tehtiin kalvojen epäsymmetrisen jousivakion vuoksi, kokoonpanona tarkastelu ottaa huomioon voiman vaikutuksen muihin rakenteisiin, esimerkiksi akselin ja väliholkin puristumisen vaikutusten mittakalvon siirtymiseen.

Kalvot käyttäytyvät epäsymmetrisesti kun kalvojen suorat pinnat on aseteltu vastakkain jolloin nivelet myös ovat vastakkain. Ollessa nivelet vastakkain, näiden lovivaikutukset ovat erisuuntaisia ja aiheuttavat molempien kalvojen väliin pientä epäsymmetrisyyttä. Tällöin kevennyksien lovivaikutukset rakenteen taivutukseen aiheuttavat, että kalvot käyttäytyvät kuten kuin rinnakkain asetetut jouset.

Voima-anturin varmuuskerroin tarkastettiin myös anturikalvojen varmuuskertoimella. Kuvissa 5 ja 6 on esitetty Lujuuslaskennan tulokset lopulliselle prototyypin voima-anturille.



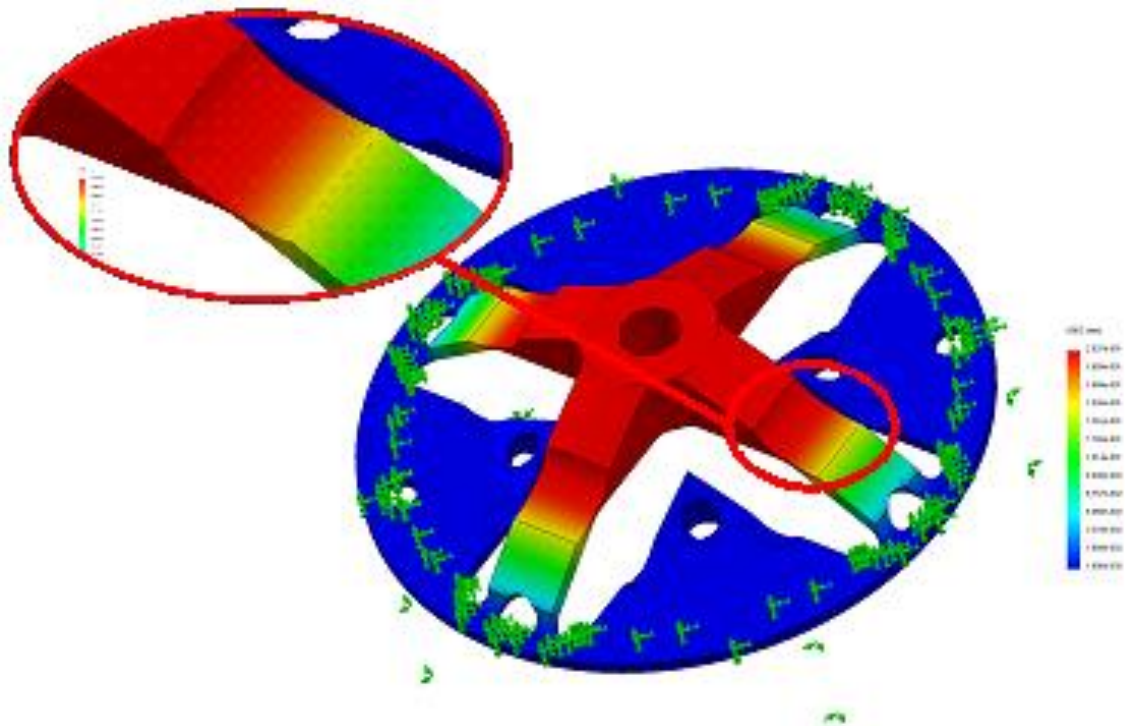
Kuva 5. Mittakalvon von Misesin jännitykset. Suurimmat jännitykset syntyivät mittakalvon ulompiin niveliin. Lujuustarkastelulla määriteltiin mittakalvon paksuus, jolloin jännitykset ja venymät saatiin venymäliuska laskentoja varten.

Kuvasta 5 huomataan, että suurin jännitys syntyy ulommassa nivelkohdassa. Tämä vähentää huomattavasti mitta- ja tukikalvon väsymislujuutta. Suurin jännitys oli noin 268 MPa ja se sijaitsi ulommassa nivelessä, kun vaikuttava voima oli 20 N. Mittaus nivelessä, pääjännitys on taivutusluontoinen ja on suurin vaikuttava jännitys. Lujuustarkastelujen tulokset ovat von Misesin yhdistettyjä jännityksiä.

Venymäliuskan venymän määrittely voidaan tehdä kahdella eri tavalla, ensimmäisessä käytetään vertailujännityksen arvoja, ja Hooken lain mukaan tarkastellaan venymää. Toinen vaihtoehto on siirtymäkuvaajasta määrittää kahden tai enemmän pisteiden välistä etäisyyksiä, niiden alkuperäisistä etäisyyksistä.

Lujuuslaskennoista voidaan Hooken lain mukaan ratkaista yhden venymäliuskan venymä. Kalvoon mallinnettiin taso, tämän tason jännityksien keskiarvolla tarkastettiin mittakalvon venymää, jolloin voima-anturin herkkyyks saatiin määritettyä. Toinen vaihtoehto von Misesin jännitykselle on hyödyntää pääjännityksien kuvaajia, jolloin tapahtuvaa leikkausjännitystä jätetään huomioimatta venymän määrittelyssä, jolloin prototyypin herkkyyks saatiin tarkemmin laskettua.

Lujuustarkastelusta nähdään myös koko rakenteen siirtyminen akselin suuntaisesti. Tämä näkyy kuvassa 6, kun voima on 20N. Mallinnusteknisesti olisi mahdollista piirtää venymän kuvaaja, mutta tämä menetelmä on huomattavasti työläämpi kuin venymän määrittely keskijännityksen avulla.

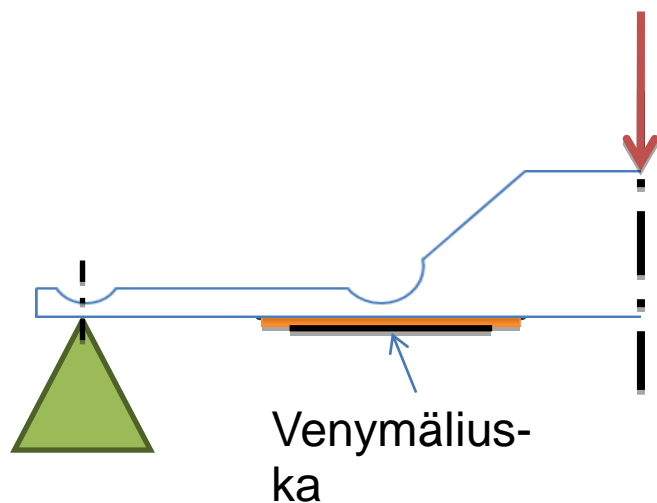


Kuva 6. Mittakalvon siirtymät. Suurin siirtymä oli noin 0,2 mm kalvon mittanivelen kohdalla..

5.7 Voima-anturi prototyypin mittauskalvo

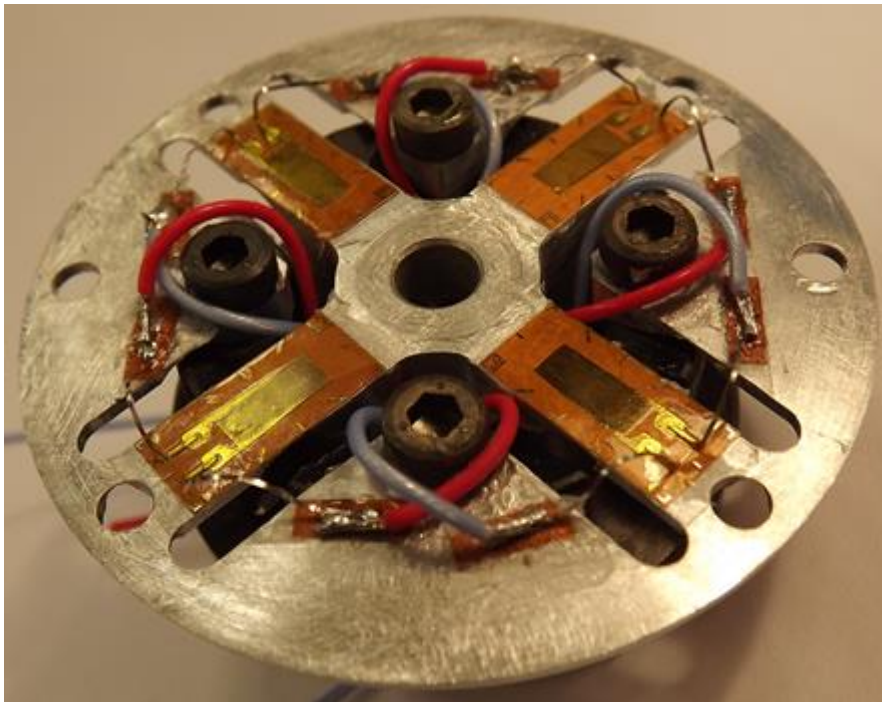
Venymäliuskojen sijainnit ovat mittanivelen alla, jolloin pääsääntöisesti mitattavan siirtymät ovat taivutusjännityksiä. Silloin kun mittakalvoa kuormittava voima on suuri, siirtymä aiheuttaa kulmavirhettä ja tämä kulmavirhe aiheuttaa vetojännitystä. Jos mittakalvo suunnitellaan suoraksi, niin molempien veto- ja taivutusjännityksien aiheuttamat venymät tietoisesti tekevät voima-anturista lievästi epälineaarisen. Taivutuksessa siirtymät ovat huomattavasti suurempia kuin vedossa, jolloin päädyttiin nivelien ratkaisuun. Kuvassa 7 on esitetty venymäliuskan sijainti mittakalvossa. Venymäjakauma tälle rakenteelle on suurimmillaan ohuimmalla kohdalla eli venymäliuska on sijoitettu siten, että tämän venymän huipentuma tulisi keskelle venymäliuskan mittausaluetta.

Jos voima-anturin mittauskalvo olisi toteutettu lievällä kulmalla verrattuna voiman suuntaan, olisi tämä voitu suunnitella siten, että pääjännitys olisi vetoluontoinen ja mahdollisesti voima-anturi olisi pysynyt lineaarisena. Päädyttiin kuitenkin ratkaisuun jossa käytettiin suoraa mittakalvoa johon on tehty tuki- ja mittausnivelet, pyrkimyksenä oli saada mahdollisimman herkkä rakenne.



Kuva 7. Venymäliuskan asennus voima-anturiprototyypin kalvoon.

Kuvassa 8 on valmis mittakalvo. Kuvassa havaittavat ruuvit ovat kaapelipitimen kiinnitystä varten. Huomattavaa myös on, että aina vastakkaiset venymäliuskat ovat kytketty erivärisillä kaapeleilla. Punaisella kaapelilla sarjaan kytketyt venymäliuskat ovat Wheatstonten sillan ensimmäinen vastus, sinisellä kaapelilla kytketyt venymäliuskat ovat kolmas vastus Wheatstonten sillassa. Kytkenät tehtiin kaapelin pidikkeen terminaalissa.



Kuva 8. Venymäliuskat voima-anturiprototyypin kalvolla.

6 Kalvojen valmistus

Mittauskalvon koneistuksessa huomattiin, että kalvoa on parasta tehdä kahdessa työstövaiheessa. Mittakalvon koneistuksessa ilmeni monta ongelmaa, joista suurin oli mittatarkkuus ja pinnanlaatu, jotka korostuivat huomattavasti kalvojen pienen ainevahvuuden vuoksi. Pinnanlaatu ongelmiin löytyi ratkaisu joka johti kalvojen ainevahvuuden suurentamiseen.

Voima-antureiden pidikkeen-osat valmistettiin sorvaamalla, hitsaamalla ja jyrsimällä. Näihin työstövaiheisiin ei syvennytä, koska ne eivät ole oleellisia osia voima-anturin konseptin kehityksestä, vaikka ne ovat tarpeellisia anturin kokoonpanon ja toimivuuden kannalta. Kuvassa 9 on kuvattu eri koneistusvaiheet.



Kuva 9. Eri koneistusvaiheet.

Ensimmäisellä työstövaiheella, kalvojen aihoiden sorvauksen ja porauksen jälkeen kalvot irrotettiin ahiosta pistotyökierron avulla. Pistotyökierron aikana ilmeni värähtely-ongelma. Tämän ongelman epäiltiin johtuvan kahdesta eri syystä:

1. Pistotyökalun jäykkyys, eli pistotyökalun rungon jäykkyys oli huono, vaihtamalla pistotyökälua olisi mahdollista vähentää tai poistaa värähtelyt osittain.
2. Kalvon reiät aiheutti pistoterään hakkaava työstö, joka vähentää työkalun elinikää, kuluttaa terää sekä aiheuttaa työkappaleeseen ei toivottua värähtelyä sekä jälkiä.

Toisessa työvaiheessa ei sorvattu, vaan käytettiin jyrsintää. Jyrsimällä tehtiin anturikalvoihin venymäliuskan ristit, nivelet ja kaapelikannakkeen reiät. Kuvassa 10 on valmiin tukikalvon kuva.



Kuva 10. Valmis tukikalvo

7 Voima-anturiprototyypin mittausvirheiden arviointi

Virhearvioinnissa ei oteta huomioon esimerkiksi kaapeleiden, juotosten sekä liitoksien ja mittalaitteiston virheitä, oletetaan että samat virheet ovat yhtä suurina ja samalla esiintymistaajuudella molemmilla voima-antureilla.

Voima-anturin valmistuksesta, materiaalista, venymäliuskoista, mittalaitteista sekä voima-anturin käytöstä seuraa virheitä. Voima-anturissa olevat virheet voidaan erotella suuriin, systemaattisiin ja satunnaisiin virheisiin. Systemaattisiin virheisiin lasketaan tunnetut ja tuntemattomat virheet.

Virheet jotka eivät kuulu kumpaakaan edellä mainitusta virhe luokituksesta, joita ei sallita tapahtuvan ja jotka voidaan estää tietyissä olosuhteissa, ovat jaoteltu seuraavasti:

- sopimattomat mittauslaitteet tai menetelmät,
- väärin asennettu voima-anturi,
- virheitä sähkökaaviossa ja tämän toteutuksessa,
- mittalaitteiden väärinkäyttö,
- virheiden laiminlyönti,

Voima-anturiprototyypissä yllämainitut virheet olivat estetty tai pyritty estämään, siten että mainitut kohteet on valittu tai toteutettu oikein ohjeiden mukaisesti, sekä kaikki kohdat ovat tarkistettuja.

7.1 Systemaattiset virheet

Systemaattiset virheet voidaan jakaa kahteen eri ryhmään, tunnetut sekä tuntemattomat. Ne syntyvät mittalaitteiden epätarkkuuksista tai tuloksien virheiden laiminlyönnistä. Systemaattiset virheet voidaan eliminoida kalibroimalla sekä toistamalla mittauksia. Mittalaitetta vaihtamalla tai olosuhteita muuttamalla systemaattiset virheet voidaan mahdollisesti minimoida.

Osa systemaattisten virheiden aiheuttajista on seuraavassa eriteltynä tarkemmin:

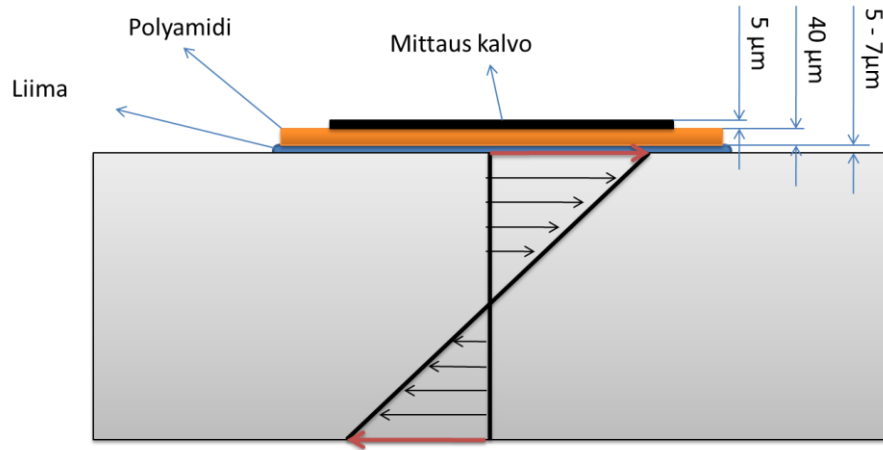
- koneistuksesta aiheutuvat virheet,
- mittausjärjestelyjen virheet,
- mittalaitteiden virheet,
- käyttäjän virheet

Venymäliuskan systemaattinen virhe voidaan yksinkertaistaa olettaen että edellä mainitut virhekohteet ovat mitättömiä, siten että tarkastimme venymäliuskan etäisyyttä materiaalin pinnasta. Venymäliuskan poikkeama asennuspinnasta aiheuttaa taivutuksen suhteellisen venymän virhettä verrattuna todelliseen venymään. Venymäliuskan systemaattinen virhe voidaan laskea kaavalla 14, ja tämä on sovellettu mittakalvon paksuuksista, sekä arvioitu venymäliuskan asennus poikkeamista jotka ovat esitettynä kuvassa 11.

$$e_{s,b} = \frac{0,5 \cdot h + d}{0,5 \cdot h} \quad (14)$$

$e_{s,b}$	venymäliuskan poikkeaman systemaattinen virhe
h	mittakalvon nivelkohdan paksuus
d	etäisyys venymäliuskan keskipisteestä mittakalvon pintaan

Kaavassa 15 oleva etäisyys voidaan kuvassa 11 havainnollistaa liimakerroksen ja venymäliuska polyamidikerroksen paksuuden summana. Kuvassa 19 on esitetty keskimääräiset venymäliuska-asennuksen kerroksien paksuudet. Venymäliuskan paksuus on 5 µm ja se on tehty kupari-nikkeli-seoksesta.



Kuva 11. Venymäliuskan asennusvirheet.

Systemaattisten virheiden arviointiin sisällytetään arvoja, joiden virheet eivät ole mitattavissa ja jotka joutuvat oletuksien alaisiksi. Niihin virheisiin kuuluvat kuormitustilanne, voima-anturin virheet, kaapelien virheet, mittalaitteen virheet, ja kuormituksen asettelu saattaa aiheuttaa virheitä. Venymäliuskan virheet voidaan yksinkertaistaa tuntemattomien systemaattisten virheiden venymäliuskan liuskavakion toleranssia. Systemaattiset virheet voidaan laskea kaavan 15 mukaan [5, s.114]

$$e_{s,u} = \sqrt{e_{s,u1}^2 + e_{s,u2}^2 + \dots + e_{s,u3}^2} \quad (15)$$

$e_{s,u}$ systemaattiset virheet

7.2 Satunnaiset virheet

Satunnainen virhe on aina sisällytetty mittauksien tuloksiin, se ei kuitenkaan johda virheellisiin mittaustuloksiin, kunhan mittaukset toistetaan riittävän monta kertaa.

Aritmeettinen keskiarvo perustuu vertailuihin. Tuloksen keskihajontaa kutsutaan uusittavuuden keskihajonnaksi ja tämä on suurempi kuin toistettavuuden keskihajonta, joka määritetään toistamalla sama mittaus. Keskimääräinen arvo mittaustuloksista voidaan laskea kaavalla 16 [5, s.114]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (16)$$

\bar{x}	aritmeettinen keskiarvo
x_n	mitatut tulokset
n	mittauspisteiden määrä

Vaihteluväli määräytyi ainoastaan pienimmän ja suurimman havaintoarvon mukaan. Täten yksikin muista suuresti poikkeava havaintoarvo aiheuttaa suuren vaihteluvälin. Keskihajonta on luku, joka kuvaa arvojen ryhmittymistä keskiarvoon.

Mitä lähemmäs keskiarvoa ja siis myös toisiaan havaintoarvot ovat ryhmittyneet, sitä pienempi on keskihajonta. Keskihajonta voidaan laskea kaavalla 17 [5, s.114]

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (17)$$

s	keskihajonta
n	mittauspisteiden määrä

Silloin kun on suuri määrä mittauksia, saadaan uusittavuuden keskihajonta. Koska käytetyt yksiköt ovat prosentteina, on keskihajonta s muutettava prosenteiksi, jolloin saadaan tulos kaavan 18 mukaan [3, s.115].

$$v = \frac{s}{|\bar{x}|} \quad (18)$$

v	keskihajonta esitetty prosentteina
-----	------------------------------------

Tulos virherajoineen esitetään aritmeettisen keskiarvon jaettuna venymäliuskan poikkeaman systemaattisella virheellä johon lisätään keskihajonta prosentteina ja systemaattiset virheet myös prosentteina. Mittaustulos virherajoineen on

$$\text{Mittauksen tulos} = \frac{\bar{x}}{e_{s,b}} \pm (e_{s,u} + v) \quad (19)$$

8 Mittausjärjestelyt

Mittaukset toteutettiin edellä kuvatussa tuulitunnelissa. Tutkimuksien aikana käytettiin yhtä mitattavaa kappaletta, näin kaikki mittaukset saadaan vertailukelpoisiksi keskenään. Kaikissa mittauksissa mitattiin ja seurattiin tuulitunnelissa virtaavan ilman lämpötilaa, varmistaen että kaikki mittaukset ovat oletettavasti samoilla olosuhteilla tehtyjä. Mittauksien mittausalue oli 1-40 m/s virtausnopeudet, 5 m/s virtausnopeuden muutoksien välein. Taulukossa 6 on eritelty mittaukset sekä mittausten toistomäärät.

Taulukko 6. Mittauksien toistomäärät.

	Kalibrointi mittaukset	Hystereesi mittaukset	Virtausvastusvoiman mittaukset
Futek LSB200	4 toistoa	4 toistoa	4 toistoa
Voima-anturi prototyyppi	5 toistoa	5 toistoa	5 toistoa

Futek LSB200-voima-anturin mittaukset tehtiin National Instruments-mittalaitteilla joihin on integroitu tuulitunneliohjausjärjestelmä, käyttäen SG24-venymäliuskamoduulia sekä LabView- ohjelmaa. Voima-anturiprototyypin mittaukset toteutettiin HBM MGC AB12-mittalaitteella jossa oli MC55-venymäliuskamoduuli, ja tuulitunnelia ohjattiin National Instruments mittalaitteilla sekä LabView- ohjelmalla.

Voima-anturiprototyyppillä tehtiin mittauksia myös National Instruments-mittalaitteilla, mutta jotta voitaisiin pois sulkea mittausetjun mahdollisia virheitä, päätettiin tehdä lopulliset mittaukset HBM mittalaitteilla. HBM mittalaitteella syöttöjännite oli 5 V silloin kuin National Instruments-laitteistolla saatiin 10 V, sillä syöttöjännite ollessa suuri on myös mittavan signaalin jännitys suurempi, mutta mitä suurempi syöttöjännite, sen suurempi on venymäliuskan lämpeneminen [15].

Kalibrointimittauksien tavoite oli määrittää kalibroiduilla punnuksilla tarkat venymäarvot, joiden avulla voima-anturien käyttäytyminen sekä ominaiskäyrät saataisiin talteen. Ominaiskäyrien avulla voidaan muuttaa mitatun venymän arvo tarkaksi voiman arvoksi.

Hystereesimittaukset sovellettiin tuulitunnelin virtausvastusvoiman mittaamiseen siten, että määriteltiin virtausvastusvoima kiihdytettäessä virtausnopeutta, sekä hystereesi määriteltiin erosta, joka syntyi kun hidastettiin virtausnopeutta.

9 Mittaustulokset

9.1 Kalibrointimittaukset

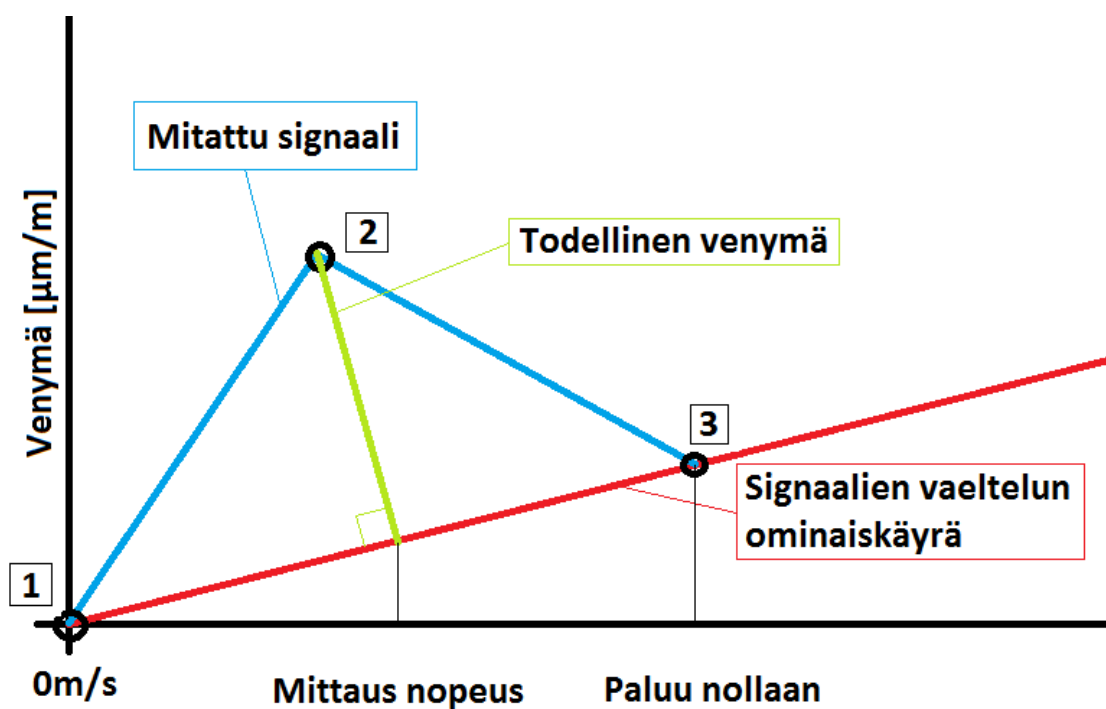
Alustavat voima-anturiprototyypin kalibrointimittaukset toteutetaan siten, että voima-anturin päälle asetetaan askeleittain tietyn painoinen punnus ja seurataan signaalin kehittymistä [4, s. 135]. Alussa kalibrointia tehtiin perinteisellä tavalla, mutta todettiin että mitatut arvot muuttuivat suuresti ajan funktiona.

Tämän kalibrointiongelman seurauksesta käytettiin perinteistä kalibrointiyritystä HBM MGC- mittalaitteella, mutta tultiin samaan lopputulokseen. Kuormitus muutettiin siten, että vaihdettiin punnukset tuulitunnelin virtausvastusvoimaan. Tämä muutos ei juuri vaikuttanut kummallakaan mittalaitteella ja käyrät olivat samankaltaisia.

Voima-anturiprototyypin signaalin vaeltelemisesta johtuen edellä kuvatun kaltaisia kalibrointimittauksia ei toteutettu. Tämän signaalin vaeltaminen tai signaalin nollapisteen siirtyminen vaikutti kalibrointi mittauksiin siten, että toteutettiin staattinen kalibrointi, jossa tuloksien käsittelyssä tehtiin mittausakselin kierto nollapisteen ympäri, akselin kierron jälkeen etäisyys mitatusta pisteestä kierretyn akselin suhteen laskettiin [5, s.57].

Lopullinen kalibrointi tehtiin tuulitunnelissa, koska virtausnopeudet ja virtausvastusker-
toimet ympyrämuotoiselle levykappaleelle on hyvin tunnettuja, jolloin päädyttiin tekemään kalibrointi- ja varsinaismittaukset suoraan tuulitunnelissa.. Kuvassa 12 on esitetty mittauksien käsittelyn periaate. Oletetaan, että nollapiste siirtyy ajan funktiona, tällöin myös kuormituksessa mitattu piste siirtyy.

Kuvassa mittauspiste 1 esittää jokaisen mittauksen lähtökohtaa. Mittaus 2 oli kuormituksesta johtuvan siirtymän mittapiste. Mittauspiste 3 oli kuormaton venymän mittapiste. Tavallisesti mittapiste 3:n tulisi olla yhtä suuri kuin mittapiste 1. Punainen viiva esittää vektoria, joka menee pisteiden 1 ja 3 lävitse, tämän jälkeen lasketaan vektori, joka on kohtisuoraan punaista vektoria, ja joka menee pisteen 2 läpi. Pisteen 2 ja punaisen vektorin välissä oleva etäisyys on todellinen venymäarvo jokaiselle mittapisteelle.



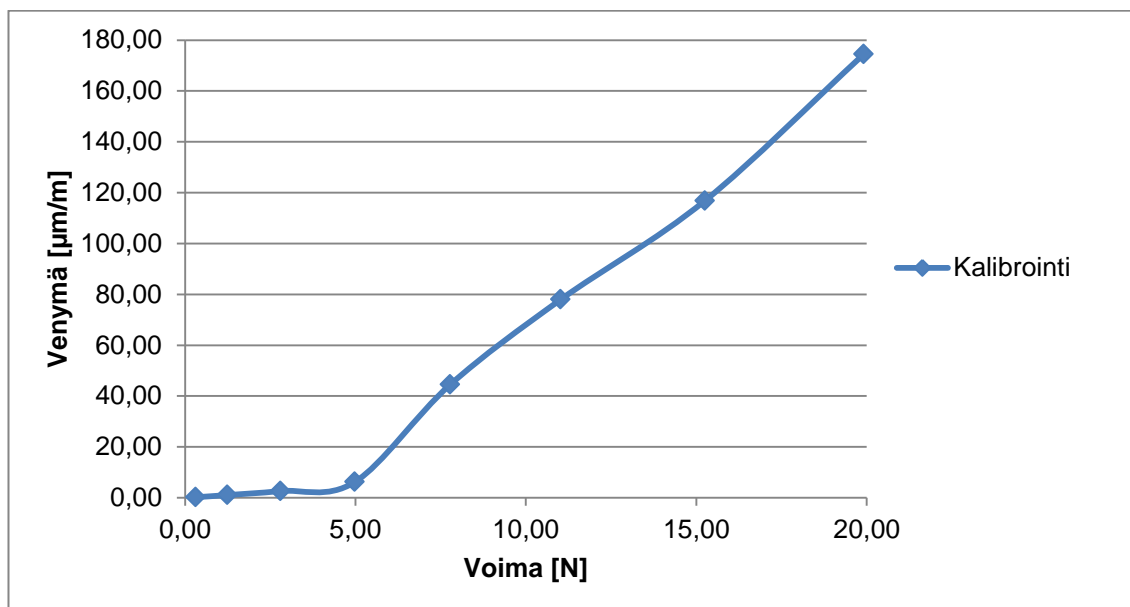
Kuva 12. Kalibrointimittauksien signaalikäsittelyn periaate.

Tarkkuus tässä menetelmässä oli riittävän hyvä, mittaus ja voima-anturin olosuhteisiin verrattuna. Signaalin aiheuttamaa ajan muutosta saatiin vähennettyä. Mittauksia tehdessä virtausnopeus asetettiin siten että voima-anturiprototyyppiin kiinnitettyyn mitattavakappaleeseen kohdistuu suurin mahdollinen mitattavissa oleva voima. Taulukossa 7 on esitetty kalibrointimittausten tulokset.

Taulukko 7. Kalibrointi mittauspöytäkirjan keskiarvot.

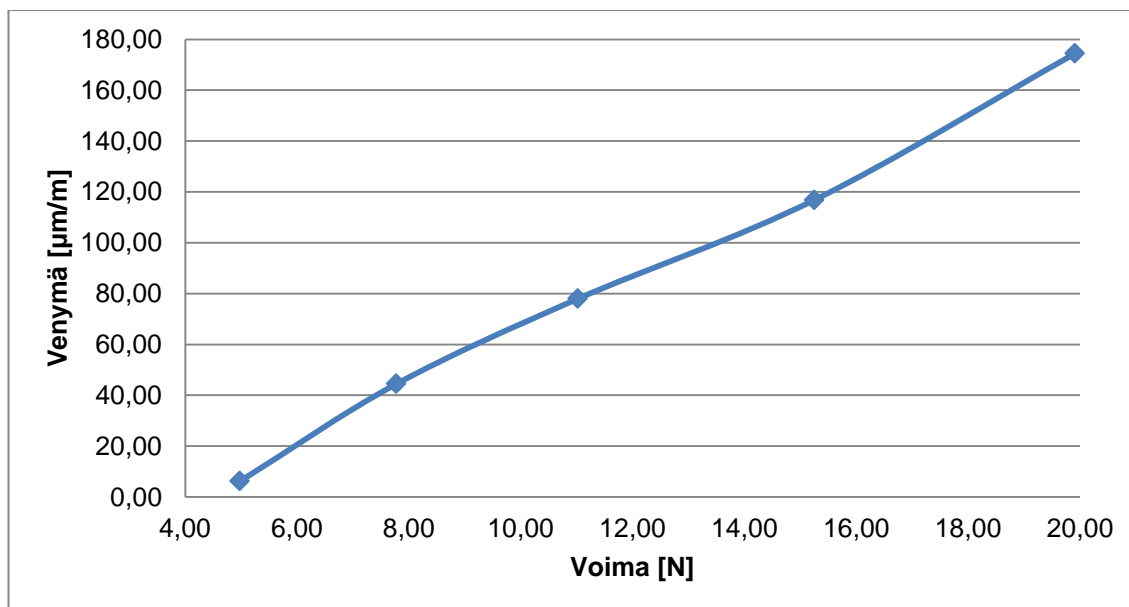
Voima [N]	0,3	1,2	2,8	5,0	7,8	11,0	15,3	19,9
Venymä [µm/m]	0,2	1,1	2,7	5,8	48,7	78	116,8	174,4
Hajonta [%]	0,2	0,2	0,2	2,23	5,7	25,3	39,8	16,5

Kuvassa 13 on mittaustuloksien kuvaaja. Kalibroinnin kuvaajan pitäisi olla lineaarinen, siten että käyrä alkaa akselien nollakohdasta. Voima-anturiprototyyppi on lineaarinen, mutta nollakohta alkaa varsinaisesti saavutettuaan 5 N voiman.



Kuva 13. Voima-anturi prototyyppin kalibrointimittaustuloksien keskiarvot.

Trendiviiva koko kalibroinnin alueella oli viidennen asteen polynomin mukainen. Jos tarkastellaan väliä 5-20 N, kalibroinnin trendiviiva on silloin lineaarinen. Kuvassa 14 on esitetty kalibroinnin lineaarisuus voimavälille 5-20 N.



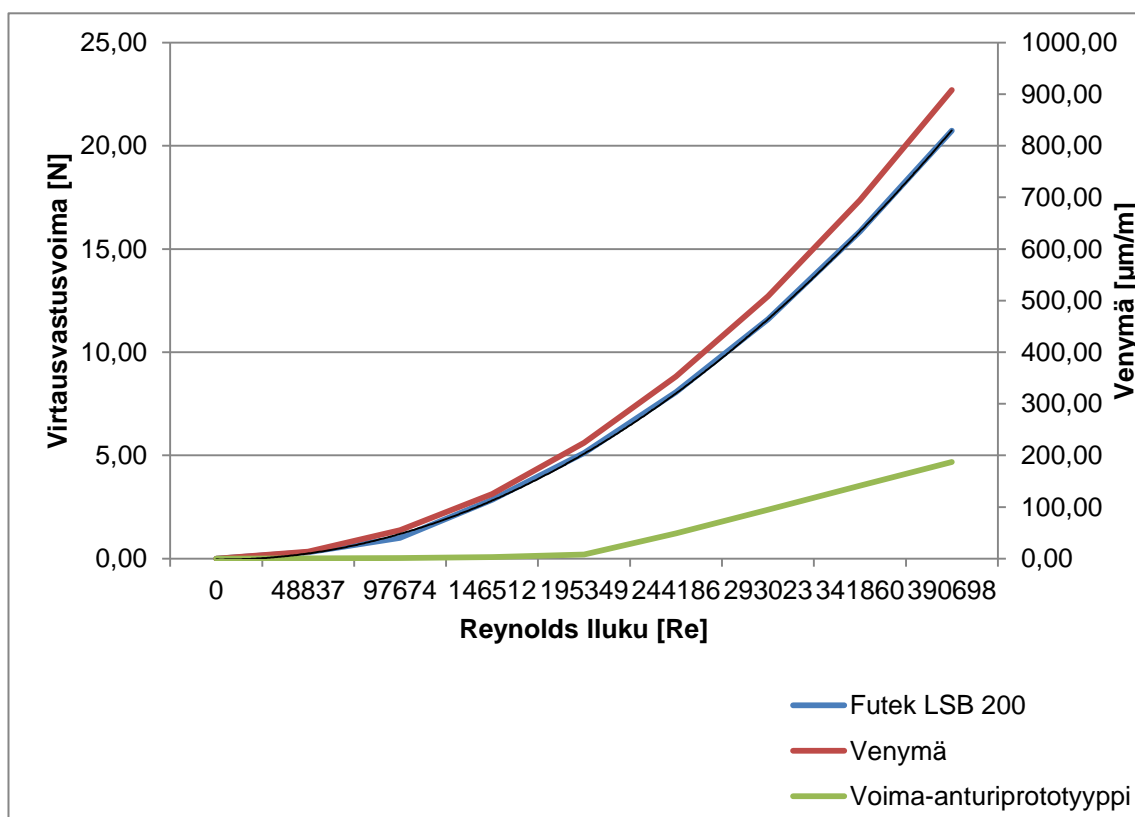
Kuva 14. Kalibrointi tulokset välille 5-20 N.

9.2 Virtausvastusvoiman mittaukset

Ilman lämpötilan todettiin pysyvän suurin piirtein vakiona mittauksien aikana, joten tuloksia laskettaessa voidaan tehdä oletus ettei ilman tiheys tai viskositeetti ole muuttunut mittauksien aikana merkittävästi.

Tuloksissa käsiteltävät virtausvastusvoimat ovat mittaussarjojen keskiarvo. Mittausten väliset virtausvastusvoimat poikkesivat kohtuullisesti toisistaan. Suurimmat arvojen poikkeamat Futek LSB200-voima-anturille ilmenivät virtausnopeuden ollessa alle 5 m/s, jolloin suhteellinen mittaustarkkuus oli huono. Voima-anturin-prototyypin arvot poikkesivat eniten, kun virtausnopeus oli alle 20 m/s, jolloin voima-anturi ei käyttäytynyt lineaarisesti.

Kuvassa 15 voidaan huomata, missä oleellisemmat virheet tapahtuivat. Prototyyppianturin käyrä sekä kuormat ovat täsmällisiä teoreettisen virtausvastusvoiman suhteen, tämä johtuu kalibrointitavasta. Oleellista on katsoa, miten voima-anturin mitattu venymä seuraa virtausvastusvoiman käyrää.



Kuva 15. Voima-anturi-prototyypin mittaustulokset.

9.3 Nollapisteen siirtymisen mittaukset

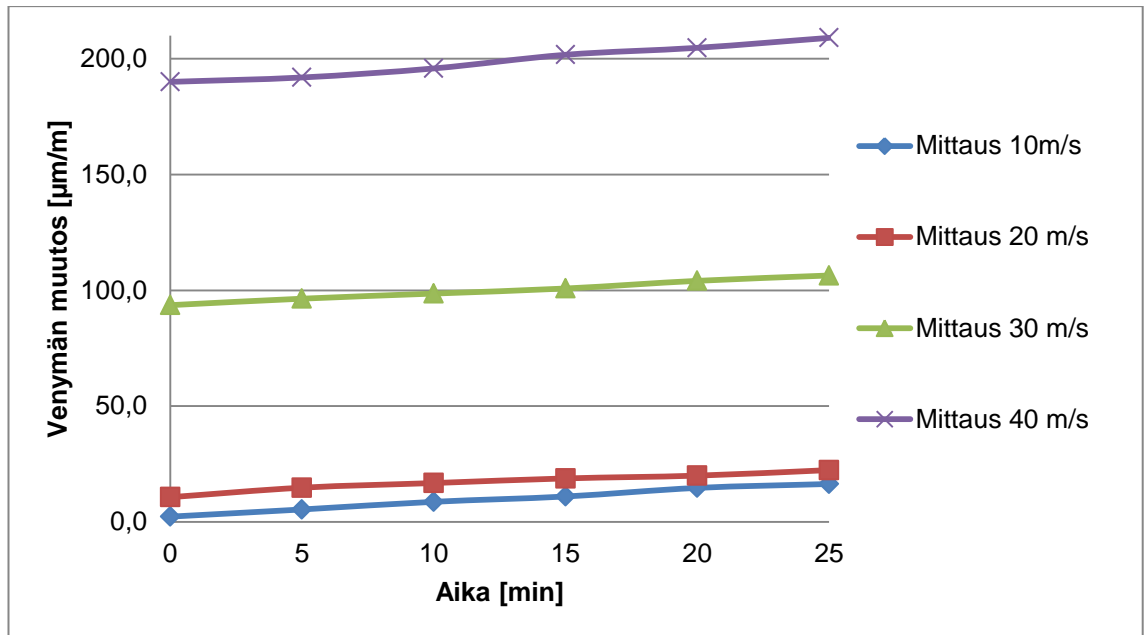
Nollapisteen vaeltaminen ajan funktiona voi johtua monesta eri syystä, venymäliuskan asennuksesta mittalaitteisiin saakka. Voima-anturi prototyypin nollapisteen siirtymisen epäiltiin suurimmaksi osaksi johtuvan kaapelin valinnasta ja pituudesta, venymä- ja kompensointiliuskojen asennuksesta ja juotoksista. Venymäliuskan ja kompensointiliuskojen asennuksessa otettiin huomioon kaikki vaaditut viimeistelyt ja pinnanpuhdistustyövaiheet. [14]

Juotosten jälkeen poistettiin huolellisesti tinan juoksutejämät, sekä tarkistettiin joka juotoksen eristysresistanssi. Eristysresistanssin suositellaan olevan 10,000 Mohm [14, s. 3], ja voima-anturin olevan kytkettynä täydennyssiltaan, jolloin huomattiin että eristysresistanssi oli pienempi kuin suositeltu arvo. Eristysresistanssin poikkeavaa tulosta tarkasteltiin kolmessa eri otteessa, näistä ei selvennyt tarkkaa syytä, mutta epäillään kaapelien erityis sekä juotosten tinan juoksutejäämiä.

Venymäliukojen kaapelit kytkettiin oikeaoppisesti voima-anturiin [14, s. 3 - 4]. Venymäliuskojen sisäänrakennetut johdot juotettiin oikeaoppisesti terminaaliiin, johon juotettiin lyhyt kaapeli. Tämä lyhyt kaapeli kiersi mittauskalvon jyrskintöjen läpi ja juotettiin toiseen terminaaliiin, joka oli mittakalvoon ruuvattu kaapelipidikkeessä. Tästä terminaalista juotettiin kaapeli, joka meni voima-anturin läpi koko matkan täydennyssiltaan saakka. Täydennyssillan kaapelit liimattiin runkoon käyttäen HBM X60-kaksikomponenttiliimaa. Tällöin todettiin että kaapelit ovat oikeaoppisesti kiinnitettyjä, mutta emme voi pois sulkea tämän vaikutusta nollapisteen siirtymiseen.

Kaapelien pituus ja kaapelin kapasitanssi voivat myös vaikuttaa nollapisteen siirtoon. Kaapelin pituus altistaa ulkopuolisten signaalien vaikutukselle mittauksiin, etenkin kuin mitattavat jännitteet ovat niin pieniä ja kaapelien pituudet suuria. [4, s. 172]

Kuvassa 16 on esitetty signaalin siirtyminen ajan funktiona. Tämä mittaus toteutettiin siten, että asennettiin voima-anturi prototyyppi tuulitunneliin, samalla mitattavalla kapaleella. Mitattiin alkupiste ilman virtausnopeutta, tämän jälkeen säädettiin virtausnopeus ja mitattiin ensimmäinen virtausvastusvoima. Tämän jälkeen kirjattiin viiden minuutin välillä virtausvastusvoiman signaalia. Mittapisteitä tuli yhteensä 6, tämä mittaus toistettiin neljällä eri ilman virtausnopeudella.



Kuva 16. Nollapisteen siirtyminen ajan funktiona.

Prototyypin nollapiste siirtyy hyvin herkästi ja nopeasti, tämä ei kuitenkaan vaikuta varsinaisesti mitattuun voimaan. Molemmat mitatun signaalin ja nollapisteen käyrät ovat samansuuntaiset, siten että nollapisteen ja mitatun signaalin käyrien pystysuuntainen etäisyys on sama. Samalla ajankohdalla molempien käyrien erotus pysyy vakiona.

10 Mittauksien havainnot ja tehdyt muutokset

10.1 Mitatun signaalin vaeltaminen

Mittausten aikana huomattiin että voima-anturin mitattu signaali vaelteli, vaeltelua kutsuttiin nollapisteen muutosta ajan funktiona. Prototyypillä onnistuttiin mittaamaan tavoiteltuja voimia, mutta nollapisteen sijainnin muuttuu ajan funktiona. Virheestä esitettiin kolme eri hypoteesia, joista ensimmäinen oli rakenteen, täydennyssillan ja venymäliuskojen lämpötilojen muuttuminen.

Venymäliuskan lämpeneminen johtuen osittaisesta syöttöjännitteen muuttumisesta lämpöenergiaksi on marginaalinen, mutta on olemassa. Venymäliuskan teho voidaan laskea [4, s.80]

$$P = \frac{V_0^2}{R_{SG}} \quad (20)$$

P teho

Kaavasta huomataan että teho nousee eksponentiaalisesti verrattuna syöttöjännitteeseen, voima-anturi lämpenee venymäliuskan vastuksesta. Asennettiin termopari voima-anturiin ja tarkastimme ettei merkittävää lämpötilamuutosta tapahtunut. Mittausten aikana huomattiin, että virtauksen, voima-anturin sisällä ja täydennyssillan lämpötilat olivat hyvin läheisiä, joten lämpenemisellä ei ole osuutta mitatun signaalin vaelteluun.

Toinen hypoteesi voima-anturin signaalin vaeltelemiseen oli materiaalin ryömintä. Miellenkiintoinen ilmiö oli, että voima-anturin ollessa missä tahansa asennossa, kuormattuna tai kuormaamattomana, voima-anturin mitatun signaalin vaelteleminen jatkui. Toinen tyypillinen materiaali ryömisilmiö on että mitattu signaali pyrkii relaksaation, havaittiin prototyypin mitattu signaalin suunnan muutosta tuntemattoman ajan välein, joka ei viittaa ryömisestä kohti relaksaatiota. Ryöminen siis pois suljettiin mahdollisena vaeltelemisen aiheuttajana.

Kolmas hypoteesi oli sähkömagneettisista taajuuksien aiheutuvaa signaalin vaeltaminen. Venymäliuskan ominaisvastus on 350Ω , jolloin venymäliuska toimii erinomaisena radioaaltojen vastaanottimena. Sähkömagneettisista taajuuksista uskotaan esiintyvän muun muassa tuulitunnelin taajuusmuuttajasta, mittalaitteista sekä mahdollisesti laboratoriossa olevista hehkulampuista.

Voima-anturin sisällä olevat venymäliuskat ovat Faradayn häkin sisällä, sekä kaapelissa on käytetty kupari suojausta, joka on kytketty sekä anturiin että täydennysvenymäliuskan runkoon. Kaapelin johteiden välinen kapasitanssi ei kuitenkaan poistu, ja tämän vaikutusta signaalin vaelteluun ei tutkittu [4, s.172]. Täydennysvenymäliuskat sijoitettiin alumiinisen kuoren sisälle joka kytkettiin voima-anturiprototyyppiin sekä mittalaitteeseen, jolloin huomattiin että mitatun signaalin vaeltelu väheni.

Tällöin todettiin, että osa vaeltelusta saattoi johtua sähkömagneettista häiriöstä venymäliuskamittauksissa [8]. Tarkastimme samalla kaikki liitoskohdat ja kaapelit kontaktihäiriön varalta.

Täydellistä vaeltamisen poistamista ei saavutettu, mutta vaeltamista vähennettiin huomattavasti. Taulukossa 8 on esitetty vaeltaminen ajan funktiona ennen erillisiä toimenpiteitä, sekä lopullinen tyydyttävä vaeltaminen ajan funktiona toimenpiteiden jälkeen.

Taulukko 8. Mitattu signaalin vaeltaminen. Mittaukset tehtiin 30 min ajan, ja saatiin molemmille ennen toimenpiteitä ja toimenpiteiden jälkeen suhteellisten venymien arvot.

	Aika [min]:	Vaeltaminen [$\mu\text{m/m}$]
Ennen Faradayn häkkiä.	30	27–30
Faradayn häkin jälkeen	30	12–15

10.2 Kappaleen värähtely mitattaessa Futek LSB200-voima-anturilla

Mittauksien aikana huomattiin silmämääräisesti kappaleen heilahtelevan suurilla virtausnopeuksilla. Heilahtelu johtui virtauksen irtoamisesta vuorotellen kummaltakin puolelta kappaleen jättöreunasta, jolloin kappaleen takana olevaan vanaveteen muodostui pyörreuna. Karmanin pyörreunasta voidaan pyörteiden irtoamistaajuutta määrittää dimensiottomalla Strouhalin luvulla, kaavassa 21 on esitetty irtoamistaajuuden laskenta Strouhalin luvun suhteen [3, s. 146]. Heilahtelu huomattiin selvästi mitattaessa Futek LSB200-voima-anturilla, voima-anturin S-muotorakenne ei ole riittävän jäykkä sivusuunnassa, jolloin anturin runko toimii jousena. Strouhalin luku lasketaan [3, s. 146]

$$f = \frac{Sr \cdot w_{\infty}}{L} \quad (21)$$

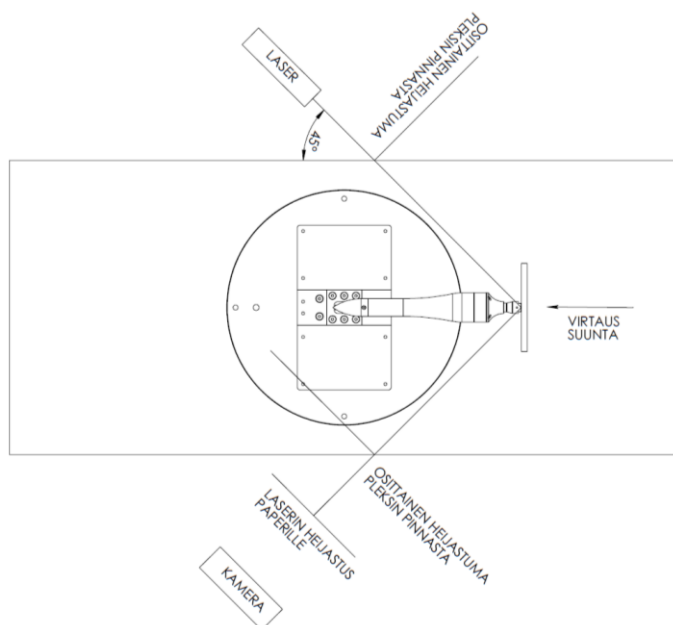
f	pyörteiden irtoamistaajuus
Sr	Strouhalin luku
w_{∞}	lähestymisnopeus
L	karakteristinen pituusmitta

Tarkasteltiin Futek-LSB200 voima-anturin sallitut sivusuuntaisen voiman rajat, ja tultiin lopputulokseen, että sivusuuntainen voima saattaa aiheuttaa suurta virhettä voiman mittauksessa johtuen venymäliuskan poikittaisesta herkkyydestä (transverse sensitivity) [4, s. 56]. Jos sivusuuntainen voima kuormittaa venymäliuskaa 1 %:lla, tämä saat-

taa aiheuttaa jopa 10 %:n virheen voiman mittauksessa. Mitatun signaalin muutos johtuen poikittaisesta herkkyydestä saattaa keskiarvottua mittauksen aikana, jolloin suurta virhettä todennäköisesti ei tulisi olemaan, suurempi ongelma on että tällöin anturia käytetään väärin. Valmistajan ohjeistuksella anturin runko ja kuori eivät saa koskettaa toisiansa, jos näin tapahtuu, näiden väliin syntynyt kitka saattaa aiheuttaa mittatulosvirheitä.

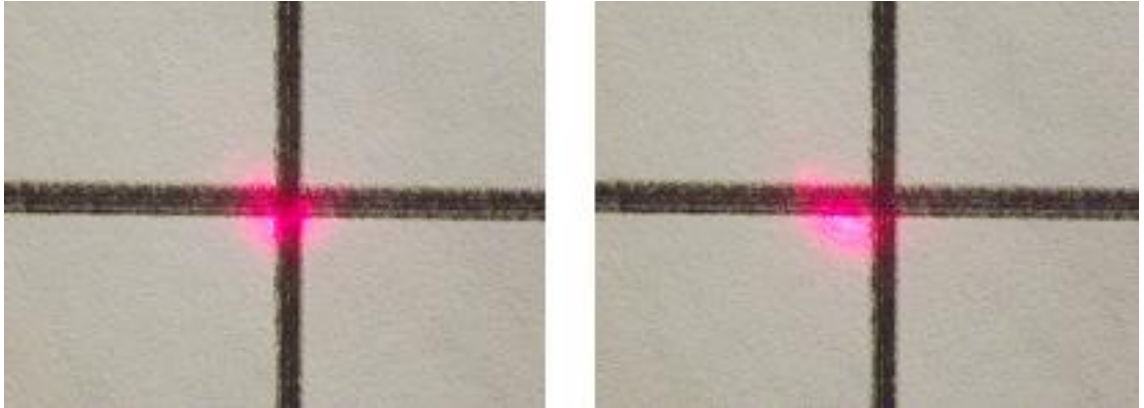
Värähtelyn taajuutta ei pyritty selvittämään, koska se ei vaikuta tuloksiin tai mittauksien taustakohinaan. Taustakohina keskiarvioitu nollaan silloin, kun on riittävän tiheä tarkasteluväli. Kuitenkaan mahdollisista mittausvirheistä johtuen kappaleen värähtelyä ei poissuljettu.

Värähtely todettiin yksinkertaisella kokeella, mitattavaan kappaleeseen sorvattiin ja kiillotettiin ruostumattomasta teräksestä tehty peilipinta, johon heijastettiin laserisäde [10, s. 355]. Säde heijastettiin peilipinnasta valkoiselle paperille, jonka keskelle piirrettiin ristikko. Kuvassa 17 on esitetty mittauksen järjestelyt. Mittauksen aikana kameralla otettiin kuvia lasersäteen siirtymisestä, jolloin havaittiin että heilahtelusta aiheutuva kulmamuuotos aiheuttaa laserisäteen siirtymistä ristikon keskipisteestä noin 2-3 Hz taajuudella.



Kuva 17. Laserin asettelu värähtelyn tarkistamiseen.

Kuvassa 18 esitetään heilahduksen aiheuttama kappaleen kulmamuutos Futek ja prototyyppi voima-antureille. Huomattiin että Futek voima-anturilla lasersäde siirtyi 5- ja 10 mm vaaka-akselilla. Molempia antureita mitattiin virtausnopeudella 40 m/s.



Kuva 18. Laserheijastuksen kuvia. Vasemmalla on voima-anturi prototyypin heijastus kuva. Oikealla on Futek voima-anturin heijastuksen kuva.

10.3 Voima-anturiprototyypin kaapelien ominaisvastuksien vaikutus

Voima-anturiprototyypin alkuperäisesti oli toteutettu siten että jokaiselle venymäliuskal-
le olivat omat syöttö- ja mittakaapelit, toisien sanoen täydennyssillalta lähti kahdeksan
kaapelia voima-anturille. Voima-anturiprototyypin kiinnitys oli hankalaa, johon voitiin
vaikuttaa vähentämällä kaapelin määrää neljään. Tämä kaapelien karsinta vaatii, että
venymäliuskat kytketään sarjaan voima-anturin rungon sisällä.

Kaapelien vähentäminen myös vaikuttaa voima-anturiprototyypin ominaisvastuksen vähentämiseen, joka taas vaikuttaa mitatun signaalin suuruuden kasvua. Kaavassa 22 esitetään vastuksen väheneminen 2 sarjakytettyä venymäliuskaa kohti johtuen kaapelimäärän vähentämisestä.

$$\Delta R = 2(R_{SG} + (n_2 - n_1)R_L) = 2R_{SG} + 2(2 - 1)R_L = 6,8\Omega \quad (22)$$

ΔR	vastuksen muutos
R_{SG}	venymäliuskan ominaisvastus
n_1	kaapelien määrä per venymäliuska ennen uudelleen kytkentää
n_2	kaapelien määrä per venymäliuska uudelleen kytkennän jälkeen
R_L	kaapelin vastus

Myös ominaisvastuksen parantamiseksi kaapelin pituutta lyhennettiin 5 m:stä 3:en, minkä seurauksena vähennettiin ominaisvastusta sekä kaapeli pinta-ala johon sähkömagneettitaajuudet saattavat aiheuttaa virhettä. Kaavassa 23 on esitetty kaapelien pituuksien lyhentämisestä aiheutuva ominaisvastuksen pieneneminen.

$$\Delta R_L = n_2 \cdot (L_1 - L_2) \cdot R \rightarrow 4 \cdot (5m - 3m) \cdot 0,34\Omega/m = 2,72\Omega \quad (23)$$

ΔR_L	kaapelin vastuksen muutos
L_1	pidemmän kaapelin pituus (5m)
L_2	lyhyemmän kaapelin pituus (3m)
R	kaapelin ominaisvastus metrin pituutta kohti [9]

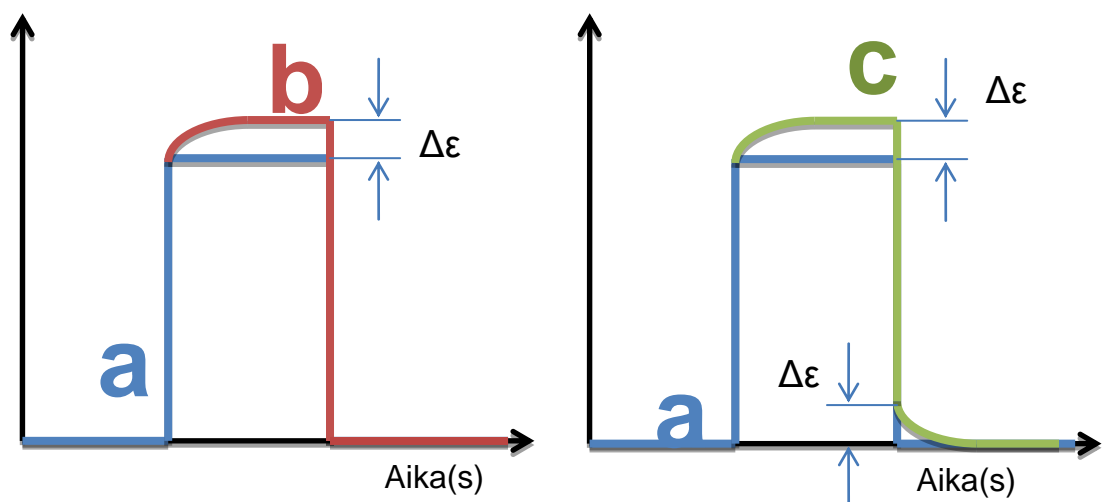
Muutoksien aikana myös siirrettiin kaapelin maadoituspisteen eli Faradayn häkin liitokohta järkevämpään paikkaan, jotta voima-anturin irrottaminen onnistuisi helpommin. Myös helpottaakseen voima-anturiprototyypin kytkentää ja käyttöä asensimme anturin rungon välittömään läheisyyteen liitin, jolla pystyttiin irrottamaan rungon anturipitimestä.

10.4 Voima-anturin mitatun signaalin muutos ajan funktiona.

Kalibrointimittauksien aikana huomattiin, että kun voima-anturia kuormitettiin, signaali ei käyttäytynyt kuormitustilanteen mukaisesti, eli mitattu signaali ajan funktiona nousi ja tasaantui vastaamaan kuormitustilannetta. Kun kuormitus poistettiin, voima-anturi kuitenkin ei palannut lähtötilanteeseen.

Ilmiö oli aluksi verrattavissa materiaalin ryömimiseen (Material creep), mutta sillä erolla, että kun kuorma poistettiin voima-anturilta, mitattu signaali ei ryöminyt lähtötilanteeseen. Materiaalin ryömimisen ominaisuus on, että mitattu signaali muuttuu ajan funktiona, sillä kuormittamattoman ja kuormitetun tilan mitatun signaalin ero on vakio, ja vastaa kuormituksen aiheuttamaa venymää. Ryömiminen ei vääristä mittaustuloksia, ja se johtuu materiaalin pyrkimisestä kohti jännittämätöntä tilaa (relaksaatio).

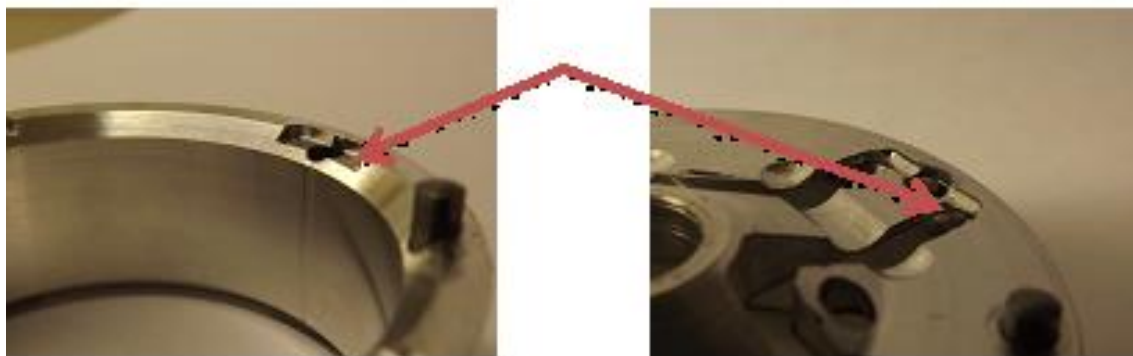
Kuvassa 19 on havainnollistettu ongelman kuvaaja vasemmalla, sekä virumisen aiheuttama kuvaaja oikealla. Huomataan selkeästi, että mitattu signaali vasemmalla olevassa kuvaajassa muuttaa $\Delta\epsilon$ verran kuormituksen aiheuttamaa venymää. Tätä poikkeusta signaalia mitattaessa epäiltiin virumisen lisäksi johtuvaksi pintojen välisestä kitkasta.



Kuva 19. Mitattu signaali esitetty vasemmalla ja oikealla on esitetty virumisen ilmiö. Kuvassa sininen käyrä "a" esittää kuormituksen ajan funktiona. Punainen käyrä "b" esittää havainnollistettu prototyypillä mitattu signaali ajan funktiona. Vihreä käyrä "c" esittää virumisen aiheuttama $\Delta\epsilon$ ajan funktiona. Käyrässä "c" huomataan että on sama $\Delta\epsilon$ kuormittaessa kun kuorman poistossa.

Voima-anturin monimutkaisesta rakenteesta aiheutuva kitka oli pintojen välinen kitka, eli esiintyy liikkuvien osien välissä eikä materiaalien sisällä. Voima-anturien mittakalvoissa olevat kiinnitysreiät olivat liian tarkkoja, jolloin kun mittakalvoa kuormitettiin, tämän ruuvien ja mittakalvossa olevien ruuvien reiät taistelivat keskenään, mikä aiheutti kitkaa näiden välissä.

Ruuvien ja reikien välissä epäilty kitka korjattiin suurentamalla reikien halkaisijat 3:sta 3,5 mm:iin. Toinen epäilty kitkan sekä mekaanisen kosketuksen aiheuttaja oli väliholkin viisteen ja mittakalvon ulompien nivelkohtien välissä. Kun mittakalvo voiman vaikutuksesta pyrki siirtymään, nivelkohta painui viistettä vastaan. Tämä painuminen aiheutti kitkaa, mutta ei suunniteltua taivutusta mittakalvolle. Tämä korjattiin väliholkkia jyrsimällä, kevennykset tehtiin kohtiin, joissa mittakalvon ulompi nivelkohta oli kosketuksissa väliholkkiin. Sama korjaustoimenpide tehtiin väliholkin toiselle puolelle kohtiin, joissa tukikalvo oli kosketuksissa väliholkkiin. Kuvassa 20 on kuvattu jyrситty kevennys väliholkkiin.



Kuva 20. Kuvassa esitetään jyrситty kevennys mittakalvon ulompien nivelen kohdalla.

10.5 Voima-anturin mittakalvon hajoaminen kalibrointimittauksien aikana

Kalibrointimittauksien yhteydessä huomattiin, että voima-anturin mitatut arvot eivät käyttäytyneet lineaarisesti, sekä mitatut arvot olivat huomattavasti suurempia kuin edellisissä kokeissa. Voima-anturin purkamisen yhteydessä huomattiin voima-anturin mittakalvossa olevan vaurio.

Mittakalvossa yhden venymäliuskan runko oli murtunut ulommalta nivelkohdalta. Tämä vaurio aiheuttaa voima-anturille epälineaarisuutta kuormituksen aikana, sillä kuorman ollessa pieni, akselisuuntainen siirtymä oli pieni. Kuorman noustessa, siirtymä myös nousi, jolloin tämä murtunut venymäliuskan runko otti kosketusta voima-anturin runkoon ja aiheutti taivutusta, jonka venymäliuska mittasi.

Murtumisen aiheuttajaksi epäiltiin koneistusvaiheessa tapahtunutta epätarkkuutta, ylikuormaa tai iskua, sekä prototyypin jatkuvaa purkamista ja kokoamista tämän insinöörityön aikana, eli materiaalin väsymistä. Kuvassa 21 on esitetty murtunut mittakalvo.



Kuva 21. Mittakalvon murtuma ulomman nivelenkohdalla.

Mittakalvon murtuminen ei juuri vaikuttanut voima-anturin toimivuuteen, sillä herkkyys nousi 1,78 % venymäliuskaa kohti ja tukevuudessa ei havaittu suuria muutoksia, kalibrointimittaukset jouduttiin toistamaan mittakalvon murtumisen jälkeen. Venymäliuskaa ei kytketty irti Wheatstonen sillasta, vaan korjattiin rakennetta siten, että kosketusta kyseisen venymäliuskan ja voima-anturin välissä ei esiintyisi.

Huomattavaa jäykkyyden muutosta ei huomattu tuulitunnelin mittauksien aikana, kun tarkkailtiin voima-anturin heilahtelua aiemmin mainitun menetelmän avulla. Voima-anturin kokoonpanon yhteydessä huomattiin, että korjaukset olivat onnistuneet siltä osin, että venymäliuskan kosketusta runkoon mittausten aikana ei esiintynyt. Oire jonka avulla virhe todettiin, eli herkkyys, poistui kokoonpanon jälkeen.

11 Voima-anturin kustannusten arviointi

Prototyypin valmistamisen kustannusten arvio on suuntaa antava ja sitä voidaan verrata kaupallisiin sovelluksiin. Kustannusten arvio tehtiin lopullisen prototyypin avulla. Molemmilla voima-antureille on yhteisiä osia, kuten anturin pidin sekä tuulitunnelin asennuslevy, joiden hinta vähennettiin vertailua varten.

Anturin hintaan ei sisällytetä kehitys- ja suunnittelu työhön kuluvaan aikaan tai kustannuksia. Jos anturia suunniteltaisiin massatuotantoa varten, niin kehitykseen ja suunnitteluun kulunut aika, ja kustannukset vaikuttaisivat lopullista hintaa. Kustannukset voidaan jakaa kahteen eri ryhmään. Näistä ensimmäinen on materiaalien ja ostokomponenttien kustannukset, ja toinen on työn kustannukset.

1. Materiaalien ja ostokomponenttien kustannukset

Materiaalihintoihin (taulukko 9) ei ole lisätty toimituskuluja, leikkauskuluja tai muita marginaalisia kuluja. Niissä ei myöskään ole otettu huomioon työstöstä aiheutuvan hukkamateriaalin ja lastujen kierrätyshyvitystä, joka massatuotannossa osittain helpottaa osto- ja valmistuskustannuksia.

Taulukko 9. Käytettyjen materiaalien hinta-arviot.

	Standardi / aihio:	Materiaali / koko:	Hinta [€/kg]: *	Määrä [kg]:	Yhteensä [€]:
Alumiini	EN 775-3 / pyörötanko	6082-T6 / Ø60	6,25	1,9	11,76
Ruostumaton teräs	1.4305 / pyörötanko	AISI 303 / Ø20	9,65	1,5	14,17
				Yhteensä [€]:	25,92

*) Hinnat perustuvat vuoden 2013 tarkistettuihin hintoihin.

Kiinnitystarvikkeisiin on eritelty ruuvit, sokat ja muut ostetut komponentit (taulukko 10). Hinnat eivät ole kilohintoja, vaan yksittäisen kappaleen hintoja. Kustannuksiin ei lisätty tarvittavia kiinnitys elementtejä koneistuskiinnittimiin, näiden oletetaan olevan yleistarvikkeita.

Taulukko 10. Kiinnitystarvikkeiden hinta.

	Standardi / koko:	Hinta [€/kpl]: *	Määrä:	Yhteensä [€]:
Kuusiokoloruuvi	DIN 912 / M3 x 35	0,3500	4	1,40
Kuusiokoloruuvi	DIN 912 / M3 x 8	0,1321	4	0,53
Kuusiokoloruuvi	DIN 912 / M5 x 16	0,0623	1	0,06
Uppokanta- ruuvi	DIN 7991 / M6 x 12	0,1452	6	0,87
Uppokanta- ruuvi	DIN 7991 / M3 x 10	0,1452	3	0,44
Mutteri	DIN 985 / M8	0,1866	1	0,19
Aluslevy	DIN 125 A / M5	0,0103	1	0,01
Jousialuslaatta	DIN 7980 / M5	0,0208	1	0,02
Lieriösokka	DIN 7 / M3 x 20	0,0856	4	0,34
			Yhteensä [€]:	3,86

*) Hinnat perustuvat vuoden 2013 tarkistettuihin hintoihin.

Taulukossa 11 on esitetty venymäliuskat ja muut tarvittavat ostokomponentit, joita tarvitaan anturointiin. Kustannusarvioon ei ole lisätty puhdistusaineita tai muita yleistarvikkeita joita, tarvitaan venymäliuskojen asennukseen. Taulukossa 12 on esitetty ostosien kokonaissumma.

Taulukko 11. Venymäliuskojen ja tarvikkeiden ostohinnat.

	Tuotenumero:	Hinta [€/kpl]: *	Määrä:	Yhteensä [€]:
Venymäliuska	1-LY13-6/350	7,70	8	61,60
Nollapisteen kompensointiliuskat	1-NA1 6/4,73	5,40	2	10,80
Juotostermiinali	LS 3	0,528	8	4,22
Juotostermiinali	LS 5	0,528	14	7,39
Venymäliuskaliima **	Z 70	0,192	24	4,61
			Yhteensä [€]:	88,62

*) Hinnat perustuvat vuonna 2011 pyydettyyn tarjoukseen.

**) Venymäliuskaliiman arvioidaan riittävän 250 venymäliuskan liimaamiseen.

Taulukko 12. Ostokomponenttien ja materiaalien aiheuttamat kustannukset.

	Hinta [€]:
Materiaalit	25,92
Kiinnitystarvikkeet	3,86
Venymäliuskat ja tarvikkeet	88,62
Yhteensä [€]:	122,26

2. Työt, tähän ryhmään sisällytetään valmistus ja kokoonpanokustannukset.

Koneistuksen kustannuksiin kuuluvat koneen vuokrat, työkalut ja muut liittyvät kulut. Koneistuksen kustannusarvio on tehty keskimääräisen Uudellamaalla sijaitsevan konepajan tuntiveloitushinnan mukaan, tarkoittaen että massatuotannossa koneistuksien kustannukset tulevat alihankinnasta.

Kustannuksissa on huomioitu pelkästään koneistukseen, kokoonpanoon ja viimeistelyyn kulunut aika. Voima-anturin valmistus voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen. Ensimmäinen vaihe on koneistus, jossa valmistetaan kaikki voima-anturin komponentit, jotka on mahdollista tehdä monitoimisorvilla. (Taulukko 13)

Taulukko 13. Voima-anturin koneistuksen kustannukset.*

	Osa numero:	Arvioitu valmistusaika [h]:	Määrä:	Hinta [€/h]:	Yhteensä [€]:
Kartio	001	0,5 h	1	65	32,5
Kappaleen pidin	002	0,5 h	1	65	32,5
Suutin	003	0,25 h	1	65	16,3
Tukilevy	004	0,75 h	1	65	48,8
Kierre Holkki	007	0,5 h	1	65	32,5
Väliholkki	008	0,25 h	1	65	16,3
Runko	009	1 h	1	65	65
Mitta kalvo	013	0,5 h	1	65	32,5
Tuki kalvo	014	0,5 h	1	65	32,5
Akseli	015	0,5 h	1	65	32,5
				Yhteensä [€]:	341,3

*) Työstöajat prototyypin valmistuksesta.

Toinen valmistusvaihe on levytyöstö ja hitsaus, tässä vaiheessa rungon pitimen putkipalkki leikataan ja muotoillaan hitsattavaksi, sekä hitsataan pitimen levy, jonka avulla pidin kiinnitetään tukilevyille. Kierreholkki myös hitsataan putkipalkin toiseen päähän, johon kartio sekä voima-anturien rungot voidaan asentaa (Taulukko 14).

Taulukko 14. Voima-anturin rungon pitimen hitsaus ja levytyöt.

	Osa numero:	Arvioitu valmistusaika [h]:	Määrä [h]:	Hinta [€/h]:	Yhteensä [€]:
Putkipalkki	004	0,5 h	1	35	17,5
Pitimen levy	005	0,5 h	1	35	17,5
Pitimen hitsaus		1 h	1	35	35
				Yhteensä [€]:	70 €

Kolmas valmistuksen vaihe on venymäliuskojen ja niiden tarvikkeiden asennus ja yhdistäminen. Tässä vaiheessa yhdistetään kaikki venymäliuskat terminaaleihin sekä kaapelien läpivienti anturirungon läpi. Kokoonpanon jälkeen on tarkistettava venymäliuskojen ja rungon välinen eristys sekä voima-anturin toimiminen. (Taulukko 15)

Taulukko 15. Venymäliuskojen asennus ja voima-anturin kokoonpano.

	Arvioitu valmistusaika [h/kpl]:	Määrä [h]:	Hinta [€/h]:	Yhteensä [€]:
Venymäliuskojen asennus	0,17 h	8	25	34
Terminaalien asennus	0,08 h	14	25	28
Kompensointi vastuksien asennus	0,17 h	2	25	8,5
Kaapelointi	1,5 h	1	25	37,5
Kokoonpano	1 h	1	25	25
			Yhteensä [€]:	133

Työkustannuksissa huomioitiin koko rakenteen valmistus, jolloin pitää muistaa, että molemmille, sekä ostetulle että valmistetulle voima-anturille, on yhteisiä osia, kuten pidike, tukilevy ja kartio. Valmistetun anturin kustannusarvio on esitetty taulukossa 16.

Taulukko 16. Voima-anturiprototyypin valmistuksen kustannusarvio.

	Arvioitu kustannus [€]:	Prosentit [%]
Ostokomponentit [€]:	103,98	22,03
Valmistuskomponentit [€]:	260	55,08
Kokoonpano [€]:	108	22,89
Yhteensä [€]:	471,89 *	

*) Kustannusarviossa ei otettu huomioon kalibrointia, lämpötila kompensointia tai vatsuksien kompensointia. Ajanarvio kalibroinnille ja säädölle on haastava määrittää.

12 Voima-anturien vertailu

12.1 Mittaustuloksien vertailu

Prototyyppi varsinaisesti käyttäytyi lineaarisesti saavutettuaan 5 N voima. Voimat ollessa pienempiä kuin 5 N olivat myös lineaarisia mutta mitattava venymä oli vähäistä, johdun siitä että rakenne vaatii pientä esijännitystä, aiheuttaen mittakalvoon vaadittava kulmavirhettä. Vertailuun käytetyllä voima-anturilla mittauspisteiden väliset erot olivat pieniä.

Voima-anturinprototyypin mittaustulos virherajoiheen virtausnopeuden ollessa 40 m/s oli: $19,9 \text{ N} \pm 12,7 \%$, verrattuna Futek LSB 200- voima-anturin mittatulokseen virherajoiheen: $20,6 \text{ N} \pm 0,1 \%$.

Mitatut voimat tuulitunnelikokeissa molemmille voima-antureille on esitetty taulukossa 17. Taulukossa 18 on esitetty laskentojen sekä mittausten lopputulokset.

Taulukko 17. Mittaustuloksien vertailu.

	Suurin mitattu voima [N]:	Mitattu venymä [$\mu\text{m/m}$]:	Herkkyys [mV/V]:
Futek LSB 200	20,64	902,75	2
Voima-anturiprototyyppi	19,9	203	0,527

Taulukko 18. Laskettu- ja mitattujen virtausvastuskertoimet.

	Virtausnopeus [m/s]	Virtausvastusvoima [N]
Futek LSB 200	40	20,6
Voima-anturiprototyyppi	40	19,9
Autodesk Simulation CFD	40	20
Laskennat kirjallisuudessa	40	19,9

Lasketut ja mitatut arvot poikkesivat toisistaan 3,5 %, joka on pieni poikkeus. Voima-anturiprototyypin arvioitu virhe oli arvioiltaan 12,7 %, joka on suurempi kuin laskettu poikkeus.

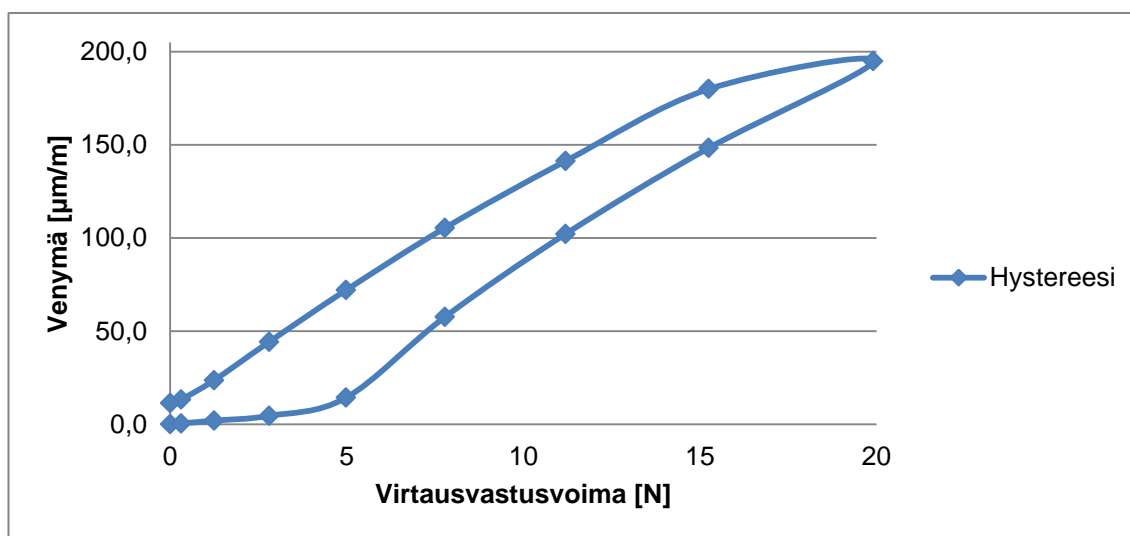
12.2 Hystereesien vertailu

Prototyypin hystereesi oli huomattavasti suurempi kuin Futek LSB200 voima-anturilla. Taulukossa 19 on esitetty molempien voima-anturien korrelaatiokertoimet. Korrelaatiokerroin on luku, joka saadaan kun standardoidaan kovarianssi välille $[-1,1]$, ollessa standardoiminen kovarianssin jakaminen keskihajonnalla. Korrelaatiokerroin käytännössä ilmoittaa mittapisteiden toleranssikuormituksen noustessa sekä laskiessa.

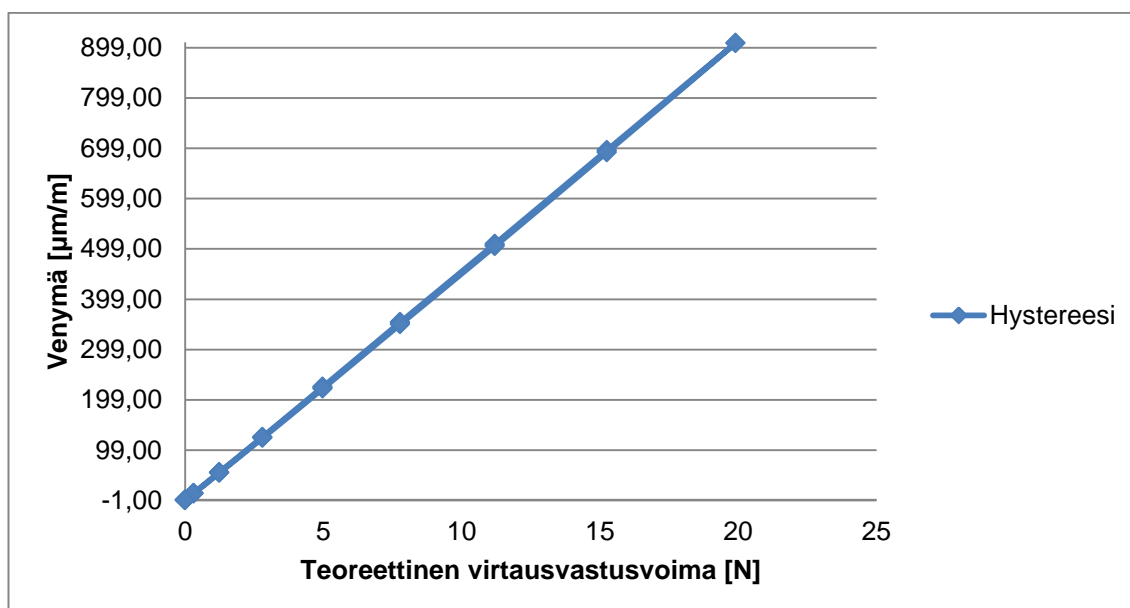
Taulukko 19. Voima-anturien korrelaatiokertoimien vertailu.

	Futek LSB 200	Prototyyppi voima-anturi
Korrelaatiokerroin	0,9999	0,9199

Futek voima-anturi on huomattavasti parempi kuin voima-anturiprototyyppi hystereesin mittauksien perusteella. (Kuvat 22 ja 23)



Kuva 22. Voima-anturiprototyypin hystereesin kuvaaja.



Kuva 23. Futek LSB 200 voima-anturin hystereesin kuvaaja.

Futek voima-anturin hystereesiksi mitattiin ± 2 %, silloin kuin voima-anturiprototyypillä mitattiin ± 36 %. Voima-anturiprototyypin hystereesiä huonontavat kuormat, jotka ovat alle 5 N, johtuen prototyypin rakenteesta. Prototyypin rakenne vaatii pientä esijännitystä joka vastaa 5 N voimaa, saavutettuaan tämän voiman prototyyppiin mittakalvo alkaa taipua mittanivelen kohdista, jolloin varsinaista suhteellista venymää aletaan mitata.

12.3 Tukevuuksien vertailu

Anturien tukevuutta ei oikean voitu tutkia, koska tämän testaaminen olisi voinut vaurioittaa anturit. Huomattiin mittausten aikana, että virtauksen irtoaminen kappaleen reunasta aiheutti kappaleeseen heilahtelua. Jos kappaleen muoto sekä virtausprofiili tunnettaisi riittävän tarkasti, voitaisiin värähtelyn avulla määrittää virtauksen nopeutta.

Virtauksen nopeutta ei tutkittu, vaan virtauksen irtoamisesta aiheutuvan värähtely kappaleessa. Kappaleen heilahtelu tutkittiin siten että heijastettiin laser säde kappaleessa olevan peilin avulla ruudukko paperille, jonka avulla pystyttiin visualisoimaan moninker- taistettuna kappaleen liikkumista. Jos ruudukkopaperi olisi kohtisuoraa lasersädettä, sekä tiedetään ruudukkopaperin ja kappaleen välinen etäisyys tarkasti, olisi mahdollista matemaattisesti tarkastella kappaleen heilahduksesta aiheutuva kiertymä.

Kuten aikaisemmin mainittu, Futek LSB 200 voima-anturin heilahtelu oli huomattavasti suurempi kuin prototyyppi voima-anturin heilahtelu. Taulukossa 20 on esitetty molempien voima-anturien heilahtelun mittaustuloksia.

Taulukko 20. Virtauksen irtoamisen aiheuttama värähtelyn vertailu.

	Virtausnopeus [m/s]	Heilahtelu (mitattuna ruudukkopaperista) [mm]
Futek LSB 200	40	~10
Prototyyppi voima-anturi	40	0..1

Värähtelystä aiheutuva heilahdus tarkoittaa Futek voima-anturilla se, että heilahduksen aikana voima-anturin runkoon ei vaan kohdistu suunnittelun mukaista taivutusjännitystä, vaan myös kohdistuu kiertymästä johtuvaa jännitystä. Tämä käytännössä tarkoittaa että venymäliuska heilahduksen aikana mittaa kahden suuntaista venymää. Tämän kahdensuuntaisen venymän mittaaminen aiheuttaa virheitä, muun muassa virheet johtuen venymäliuskan poikittaisesta herkkyydestä (transversal sensitivity), esimerkiksi jos

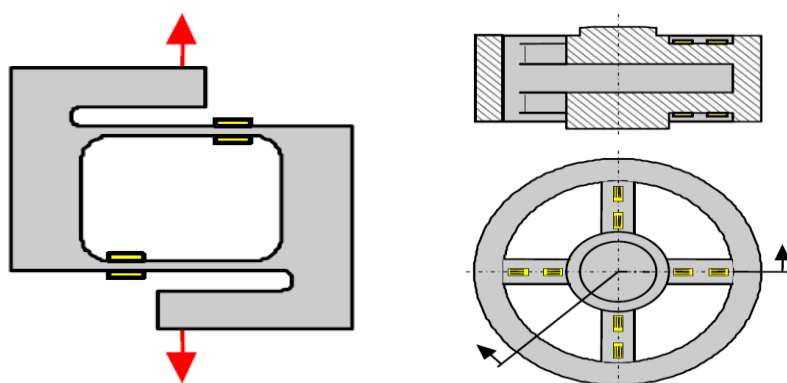
venymäliuskan poikittaisen herkkyys on 1 %, tämä voi aiheuttaa jopa 10 % virheen mitatusta venymäliuskan pituussuuntaisesta venymästä. [4, s.179;12, s. 93]

Mainittava myös on että prototyyppi voima-anturin symmetrinen rakenne tuo samankaltaista jäykkyyttä vaaka- että pysty suunnissa, mittaukset olivat tehty vaan vaakatason heilahduksen varalta.

12.4 Rakenteiden vertailu

Voima-anturiprototyypin rakenteen tukevuus oli huomattavasti Futek LSB 200-voima-anturia parempi. Pitää kuitenkin huomioida Futek voima-anturin rakenteen yksinkertaisuus verrattuna voima-anturiprototyyppiin. Futek voima-anturissa oli ainoastaan kaksi osaa, josta yksi oli itse anturin runko, ja toinen oli suojakuori. Voima-anturiprototyypin monimutkaisessa rakenteessa oli 10 osaa.

Kuvassa 24 on esitetty perinteisen S-muotoisen voima-anturin periaatekuva. Vertailussa käytetty Futek LSB200 voima-anturi on tyypiltään S-muotoinen. Futek anturi todettiin hyvin soveltuvaksi tuulitunnelimittauksiin, vaikka tämän tukevuus ei ollut välttämättä riittävä. Voima-anturiprototyypin massiivinen rakenne toimi kohtalaisesti tuulitunnelimittauksissa, vaikka herkkyys ei saavuttanut tavoiteltua arvoa.



Kuva 24. S-muotoisen ja kalvo voima-antureiden periaatekuvat.

Syitä voima-anturin herkkyyksille on monia, kuten sisäinen kitka, ulkopuolinen tai pintojen välinen kitka, mittakalvon palautuminen sekä rakenteelliset suunnitteluvirheet. Tässä insinööriyössä virheisiin otetaan kantaa jatkotoimenpide osiossa.

12.5 Hintavertailu

Kuten mainittiin voima-anturin kustannusarviossa, prototyypin kustannuksiin ei sisällytetty suunnitteluun ja prototyyppieihin käytettyä aikaa tai kustannuksia. Myöskään huomioon ei otettu tuotantotilojen, tarvittujen mitta- ja työstölaitteiden sekä ylläpidon kustannuksia.

Prototyypin skaalaaminen massatuotantoon tulisi laskemaan valmistuskustannuksia, mutta tämän arvioiminen on lähes mahdotonta. Taulukossa 21 on esitetty voima-antureiden arvioidut hinnat ja ominaisuudet. Voima-antureiden hintojen vertailussa voidaan esittää arviot ainoastaan suuruusluokkina.

Taulukko 21. Voima-anturien hintavertailu. Hintavertailussa otettiin huomioon ainoastaan ne kustannukset jotka ovat voima-anturikohtaisia. Toisien sanoen esitetyt hinnat eivät sisällä tuentojen hintaa, vaan pelkkä voima-anturi kokonaisuus.

	Futek LSB200 Junior S	Prototyyppi voima-anturi
Hinta [€]:	531 € *	471,89 €
Ominaisuudet:	Jännitesyöttö: 10 V Mittausalue: 0 - 22,2 N Käyttölämpötila: -50...93 °C Ominaisresistanssi: 352 Ω	Jännitesyöttö: 10 V Mittausalue: 0 – 50 N** Käyttölämpötila: 0 – 50 °C** Ominaisresistanssi: 720 Ω

*) Hintatieto saatu vuonna 2013 Elkome verkkokaupasta.

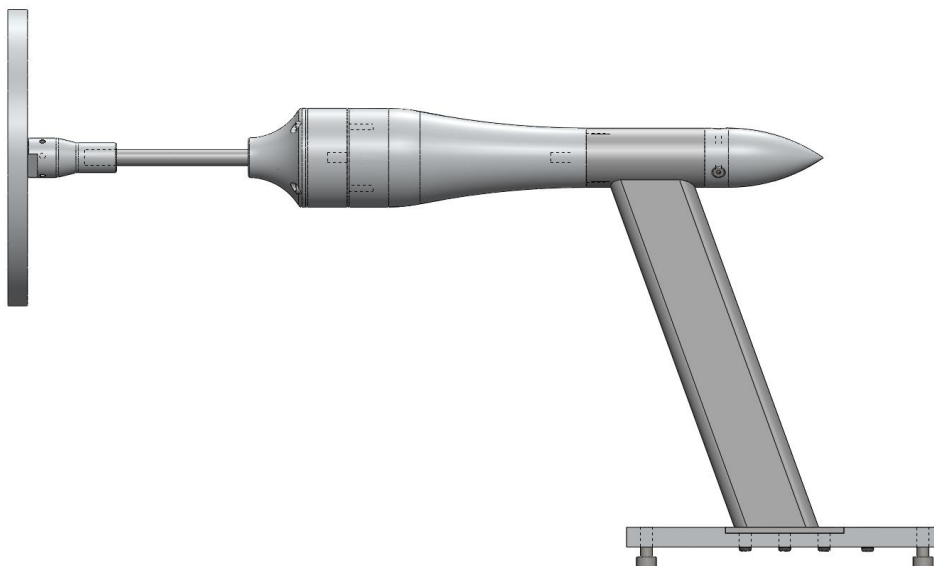
**) Arvioitu

13 Jatkotoimenpiteet

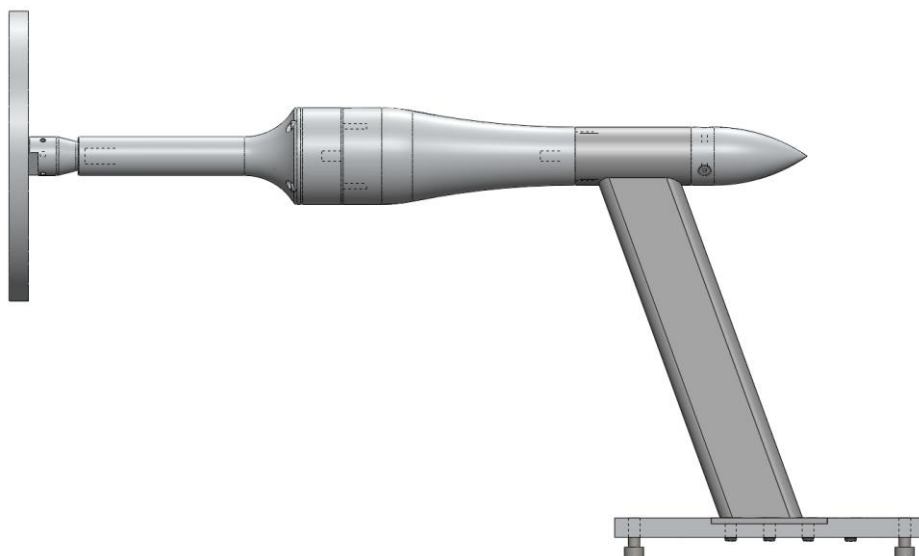
Tässä osiossa kerrotaan tuleville kehittäjille miten toimivuus voidaan varmistaa, sekä millaisia ongelmia tulivat vastaan. Jatkotoimenpiteet eritellään neljään eri osioon, ensimmäinen osio ollessa prototyypin muotoon liittyvät ongelmat.

Voima-anturin muotoilua voisi parantaa käyttämällä enemmän virtaus-simulointiaikaa, sekä kasvattamalla mitattavan kappaleen ja voima-anturin rungon välistä etäisyyttä. Etäisyyttä voidaan kasvattaa eri tavoin, esimerkiksi pidentämällä voima-anturin akselia (kuva 25).

Akselia pidennettäessä tulee vastaan akselin taivutus, jolloin kovin suurta etäisyyttä ei saada aikaiseksi. Toinen vaihtoehto on pidentää akselia, siten että tukikalvoa siirretään putken välityksellä lähelle kappaletta (kuva 26). Tukikalvon ja putken ulkohalkaisija on tehtävä riittävän pieneksi jotta rakenne ei aiheuttaisi mittausvirheitä, rakenteet tulisi mallintaa CFD ohjelmistoilla.



Kuva 25. Mallinnettu esimerkki jossa kappaleen ja voima-anturin rungon etäisyyttä kasvatettiin akselia pidentämällä.



Kuva 26. Mallinnettu esimerkki jossa kappaleen ja voima-anturin rungon etäisyyttä kasvatettiin akselia pidentämällä ja siirtämällä tukikalvo mahdollisen lähelle kappaletta hyödyntämällä suo-japutkea.

Tämä todennäköisesti vaatisi, että voima-anturin sijainti tuulitunnelissa siirtyisi mittausalueen ulkopuolelle, ja mieluiten mitattavan kappaleen taakse. Myös mitattavan kappaleen tulisi olla paremmin soveltuva pieneen tuulitunnelin mittausalueeseen, jotta tämän seinämät eivät vaikuttaisi kappaleen mittauksiin.

Toinen osio on voima-anturiprototyypin rakennetta koskevat jatkotoimenpiteet. Voima-anturin kaksois-mittakalvon rakenne osoittautui riittävän tukevaksi tuulitunnelimittauksiin, ja jatkotoimenpiteet mittakalvolle on eritelty seuraavasti:

- Mittakalvo tulisi valmistaa materiaalista, jolla olisi suurempi kimmokerroin, esimerkiksi ruostumattomasta teräksestä. Mittakalvon muoto voidaan tällöin tehdä helpommaksi. Vaihtamalla paremmin soveltuvaan materiaaliin myös pidentään voima-anturin käyttöikää, sillä väsymislujuuden raja ei tule niin helposti vastaan.
- Molempiin mittakalvoihin kannattaisi asentaa venymäliuskat, jolloin kaikki Wheatstonen sillan venymäliuskat olisivat mittaavia. Tämä on kannattavaa myös, jos mittakalvon materiaalia muuttaa jäykemmäksi.
- Kuten mittauksissa huomattiin, kun virtausnopeus oli alle 20 m/s, voima-anturi käyttäytyi epälineaarisesti. Tämä käyttäytyminen saadaan todennäköisesti poistettua, jos tuleviin voima-anturin rakenteisiin tehdään esijännitys kalvolle tai suunnitellaan mittauskalvo siten, että venymäliuska on lähtötilanteessa kulmassa verrattuna voimaan.
- Mittakalvon rikkoutumisen varalta on suositeltavaa rakentaa mekaaninen pysäytin, tällöin välttyttäisiin pysyviltä muodonmuutoksilta ja säästyttäisiin mahdolliselta mittakalvon rikkoutumiselta.

Kolmas osio koskee kaapeleita ja sähkömagneettiset. Voima-anturista lähtevien kaapeleiden tulisi olla paremmin suojattuja radiotaajuuksia vastaan. Tässä insinööriyössä käytetty kaapelin suojaus oli kuparipunos, joka on hyvä, mutta ei riittävän suojaava. Jokainen reikä suojauksessa altistaa mittauksia vääristymiselle johtuen radiotaajuuksista. Kaapelit tulisi valita siten, että niissä olisi mahdollisimman pieni kapasitanssi, sekä johdot tulisi lyhentää mahdollisuuksien mukaan. Faradayn häkin eristystä kannat-

taisi testata, sillä testaaminen on ainoa tapa varmistaa, että radiotaajuuudet ja muut sähkömagneettiset ilmiöt eivät vääristä voima-anturin mittauksia.

Mainittava on myös se, että jos kaapelien pituudet ovat suuria, on suositeltavaa tehdä kuuden johtimen siltakytkentä, jolloin johtimista aiheutuvat vastuksen muutokset voidaan poistaa ja siten lisätä mittaustarkkuutta.

Neljäs osio koskee venymäliuskan valintaa, sekä Wheatstonen sillan kompensointia. Voima-antureissa on suositeltu käytettäväksi 350 k:n venymäliuskoja. Venymäliuskojen asennuksen onnistumisella on merkittävä vaikutus voima-anturin toimintaan. Myös Wheatstonen sillan sijaintia tulisi ajatella tarkkaan. Tässä työssä tehty täydennyssiltaratkaisu ei ollut riittävän hyvä, sillä pitkien kaapeleiden ollessa venymäliuskojen välissä, lisäsivät anturin ominaisvastusta.

- Käyttämällä venymäliuskoja, joissa on pienempi ominaisvastus, voidaan varmistaa, etteivät yleiset sähkömagneettiset taajuuudet aiheuta vääristymiä mittauksiin. Myös eristyksen vaihtelut vaikuttavat vähemmän venymäliuskaan jossa on pienempi ominaisvastus [4, s.51].
- Lämpötilakompensointi on syytä tehdä aina kun käytetään venymäliuskoja voima-anturien tekemiseen.
- Wheatstonen sillan kompensointi ja herkkyys (sensitivity) kompensointi ovat avaintekijöitä saada Wheatstonen silta säädettyä oikein, eli nollaan. Venymäliuskamittauksissa verrataan syöttöjännitettä tulojännitteeseen, jolloin nollaan säädetty voima-anturi on aina oletusarvoisesti nolla. Jos tätä ei tapahdu, voidaan epäillä ylikuormituksesta aiheutuvaa pysyvää muodonmuutosta tai muuta virhettä mittaushetjässä, eli tämä toimii myös ennakoivana toimenpiteenä.

14 Yhteenveto

Tässä työssä suunniteltiin voima-anturiprototyyppi käytettäväksi tuulitunnelissa tehtäviin virtausmittauksiin. Voima-anturin kehitysidea oli hyvä, sillä tunnetusti tuulitunnelimittauksissa käytetään samankaltaisia rakenneratkaisuja, mutta hieman eri tavalla.

Voima-anturiin kehitetty kaksois-kalvorakenne toimi hyvin, kalvoratkaisu todettiin toimivaksi sekä käytännölliseksi. Kaksoiskalvon käyttäminen paransi huomattavasti voima-anturin tukevuutta verrattuna perinteiseen S- muotoiseen voima-anturiin. Prototyypille haettiin suurinta mahdollista tukevuutta verrattuna herkkyyteen, tämän saavuttaminen vaati kompromissien tekoa.

Anturin herkkyyteen olisi pitänyt perehtyä enemmän, mittaustuloksista huomattiin, että Futek LSB 200 S-muotoisen voima-anturin herkkyys oli speksien mukainen 2 mV/V, kun voima-anturiprototyypillä saavutimme vain 0,572 mV/V.

Voima-anturiprototyypin muotoilua tutkittiin alustavasti ja todettiin että mitattavan kappaleen ja voima-anturin rungon etäisyyttä tulisi suurentaa siten että anturin muotoilu ei vaikuttaisi virtauksen aiheuttamasta kappaleen taakse syntyvään paine-eroon. Kasvatamalla kappaleen ja voima-anturin rungon välistä etäisyyttä, varmistettaisiin, ettei rungosta aiheuttaisi niin merkittäviä mittaustuloksiin virheitä.

Voima-anturin mittausrvirheet ovat suurempia kuin kitkavastusvoima, joten kitkavastusvoiman vaikutusta ei huomioitu virtausvastusvoiman määrittelyssä.

Huomattiin tämän työn aikana että olisi suositeltavampaa käyttää ruostumatonta terästä voima-anturin rungossa sekä mittauskalvoissa johtuen sen suuremmasta myötö- ja murtorajasta sekä kimmokertoimesta verrattuna alumiiniin.

Voima-anturin eristäminen Faradayn häkin avulla oli oleellista, etenkin kun käytettävien venymäliuskojen ominaisvastukset olivat 350 Ω . Venymäliuskat joiden ominaisvastus on 350 Ω tai suurempi, ovat tiedetysti tehokkaita antenneja sähkömagneettitaajuuksille. Toinen vaihtoehto olisi käyttää venymäliuskoja, joiden ominaisvastus olisi alhaisempi. Käyttämällä alhaisempia ominaisvastuksia vähennetään niiden lämpenemistä, sekä eristysresistanssin vaihtelut ovat huomattavasti pienempiä.

Lopullista voima-anturin onnistumista ei voitu todentaa, sillä havaittiin tämän työn kehittelyn aikana monta ongelmaa ja ilmiötä joihin ei pystytty varautumaan. Ongelmat kuten signaalin vaeltaminen, kitkat ja mittakalvon murtuminen ratkaiseminen, sekä sähkömagneettisientaajuuksien vähentäminen voima-anturin rakennusvaiheessa johti kohtalaiseen toimivaan anturiin. Tavoite herkkyys ja toistotarkkuus eivät riittäneet, mutta mitaukset saatiin tehtyä tavoitteen mukaisesti.

Lähteet

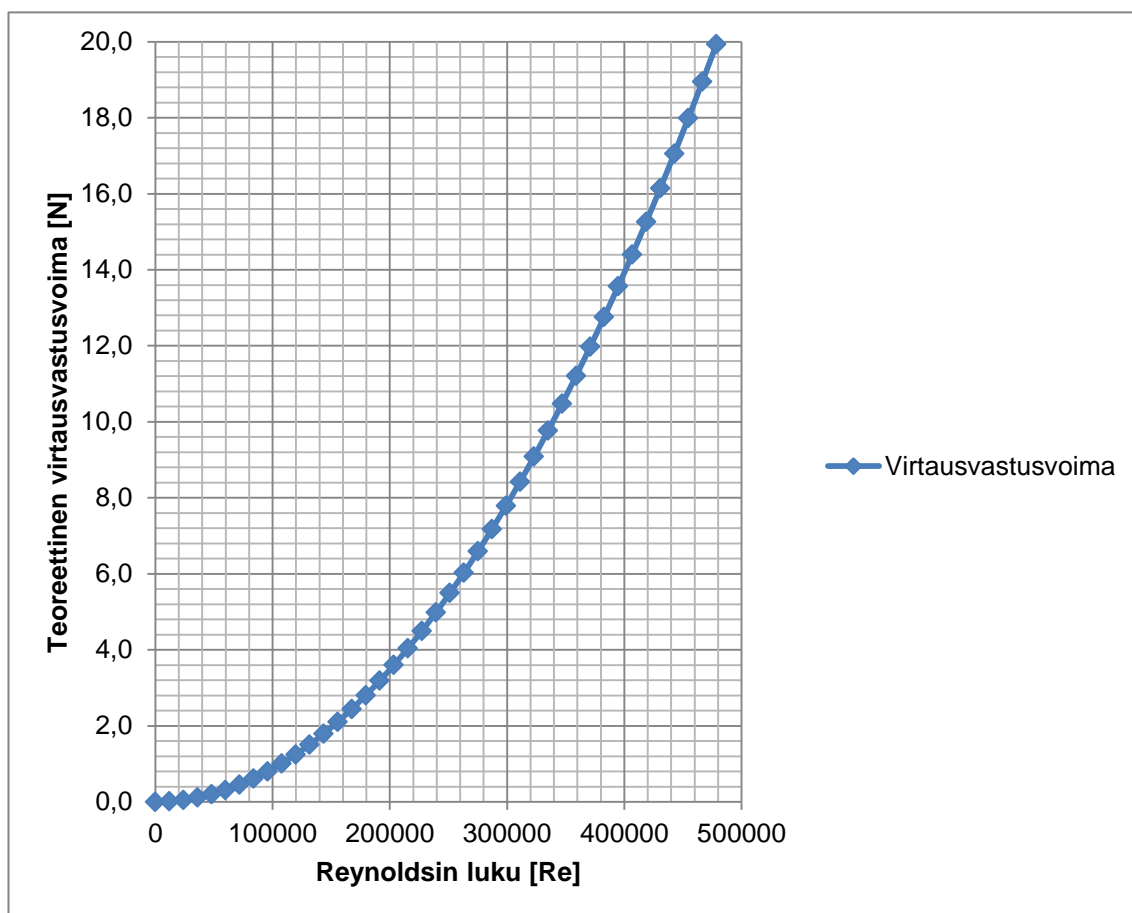
- 1 EN AW-6082 T6 alumiinin ominaisuudet. Matweb tietokanta.<<http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=fad29be6e64d4e95a241690f1f6e1eb7&ckck=1>> Luettu 9.4.2013
- 2 Teräsrakenteiden suunnittelu. Eurocode 3 (1993-1-1), 2006. Suomen Standardisointiliitto SFS
- 3 Bohl, Willi 1984. Teknillinen virtausoppi. Jyväskylä: Gummerus Oy.
- 4 Hoffmann, Karl 1989. An introduction to Measurements using Strain Gages. Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH
- 5 Laitinen, Esko - Mäkelä, Mikko – Soininen Lauri – Tuomola, Seppo 1979. Tammer-tekniikka kaavasto. Tampere: Vammalan Kirjapaino Oy Offset.
- 6 Çengel, Yunus 2006. Heat and mass transfer. Singapore: Mc Graw Hill.
- 7 Suvanto, Kari. 2005. Fysiikka 1. Helsinki: Edita.
- 8 Maximizing strain gage & load cell accuracy. Valmistajan verkkodokumentti. GW Instruments, INC.
<http://www.gwinst.com/data_acquisition/force/sg_theory.html>. Luettu 19.4.2013
- 9 Wires and standard wires. Valmistajan verkkodokumentti. HBM.
< <http://www.hbm.com/en/menu/products/strain-gages-accessories/accessories/wires-stranded-wires/>>. Luettu 21.4.2013
- 10 Suvanto, Kari - Laajalehto, Kari. 2008. Fysiikka 2. Helsinki: Edita.
- 11 White, M. Frank 2003. Fluid mechanics, Fifth edition. New York: Mc-Graw Hill Companies, Inc.
- 12 Errors due to transverse sensitivity in strain gages. Valmistajan verkkodokumentti. Vishay Precision Group.< <http://www.vishaypg.com/docs/11059/tn509tn5.pdf>>. Luettu 24.2.2013.
- 13 Blanter, Mikhail-Golovin, Igor-Neuhäuser, Hartmut-Sinning, Rainer 2007. Internal friction in metallic materials. Berlin Heidenburg: Springer-Verlag.
- 14 Installation verification. Valmistajan verkkodokumentti. Vishay Precision Group.
< <http://www.vishaypg.com/docs/11171/MM-8.pdf>>. Luettu 5.5.2013.

- 15 Measuring Strain with Strain Gages. Valmistajan verkkodokumentti. National Instruments. < <http://www.ni.com/white-paper/3642/en>>. Luettu 26.5.2013.

Teoreettinen virtausvastusvoima

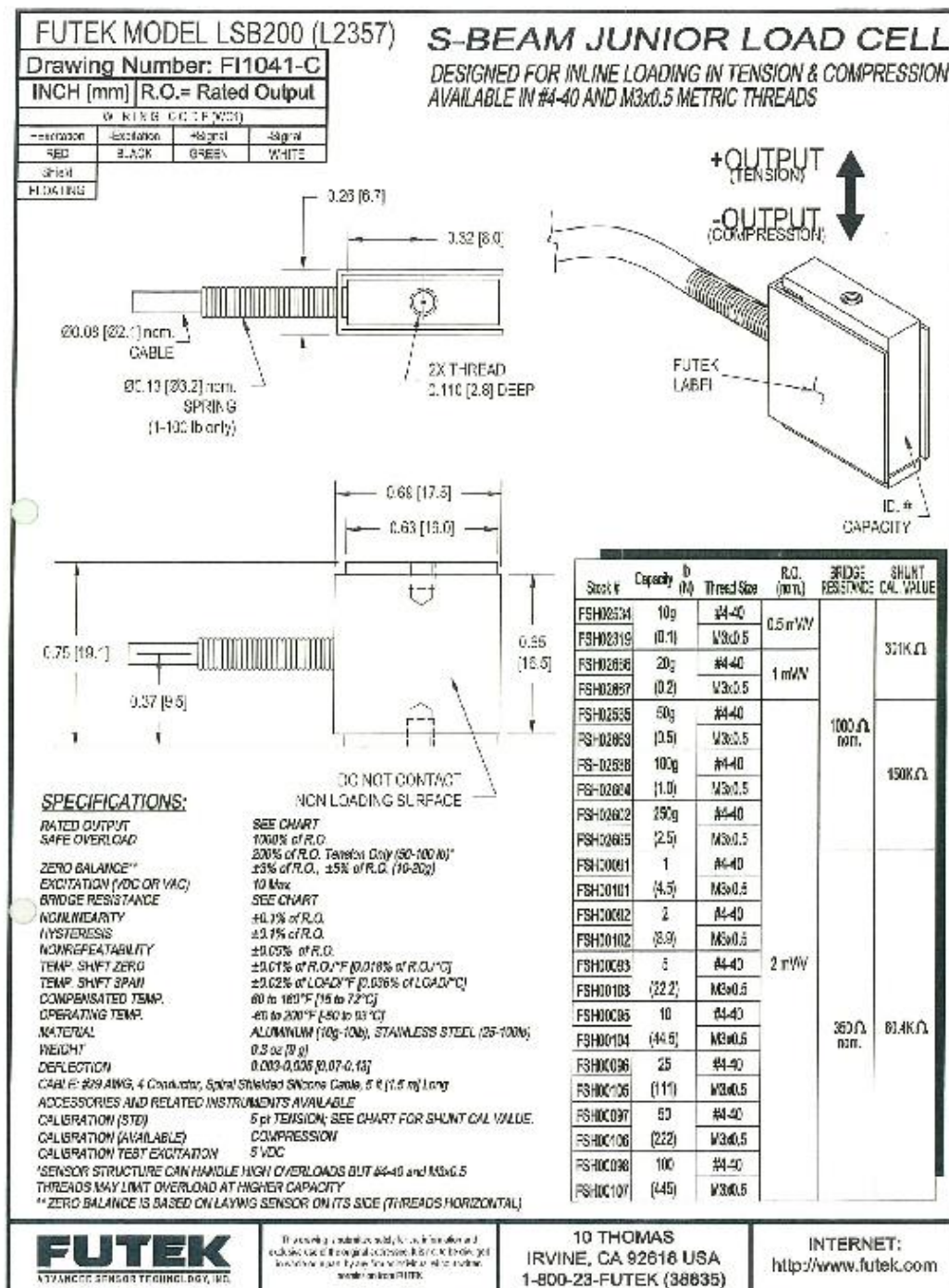
Ilman ominaisuudet:		
Ilman lämpötila [°C]:	20	°C
Ilman tiheys [kg/m ³]:	1,204	kg/m ³
Ilman viskositeetti [m ² /s]:	1,51E-05	m ² /s
Virtausvastuskerroin:	1,17	
Kappaleen ominaisuudet:		
Halkaisija [mm]:	150	mm
Pinta-ala [mm ²]:	1,77E+04	mm ²
Laskennat:		
Ilman virtausnopeus [m/s]:	Reynoldsin luku [Re]:	Painevastusvoima [N]:
0	0	0,000
1	11962	0,012
2	23925	0,050
3	35887	0,112
4	47849	0,199
5	59811	0,311
6	71774	0,448
7	83736	0,610
8	95698	0,797
9	107660	1,009
10	119623	1,246
11	131585	1,507
12	143547	1,794
13	155510	2,105
14	167472	2,442
15	179434	2,803
16	191396	3,189
17	203359	3,600
18	215321	4,036
19	227283	4,497
20	239246	4,983
21	251208	5,494
22	263170	6,029
23	275132	6,590
24	287095	7,175
25	299057	7,786
26	311019	8,421

27	322981	9,081
28	334944	9,766
29	346906	10,476
30	358868	11,211
31	370831	11,971
32	382793	12,756
33	394755	13,566
34	406717	14,400
35	418680	15,260
36	430642	16,144
37	442604	17,054
38	454567	17,988
39	466529	18,947
40	478491	19,931



Kuva 1. Teoreettisen virtausvastusvoiman kuvaaja.

Tekniset tiedot sekä kalibrointipöytäkirja Futek LSB 200 voima-anturille



FUTEK
ADVANCED SENSOR TECHNOLOGY, INC.

Certificate Number **1103220029**

Single Channel Item

CALIBRATION DATA

Test Temp ... 72.5 °F (22.4 °C)	Relative Humidity ... 47.5 %
Input Resistance ... 251Ω	Output Resistance ... 35Ω Ω
Excitation ... 1.99 Vdc	Zero Balance ... -0.0155 mV/V

Tension

Load (lb)	Output (mV/V)	Non-Linear Error (% R.O.)
0	0.0000	0.000
1	0.3918	0.037
2	0.7835	0.069
3	1.1747	0.075
4	1.5659	0.081
5	1.9554	0.080
0	-0.0012	

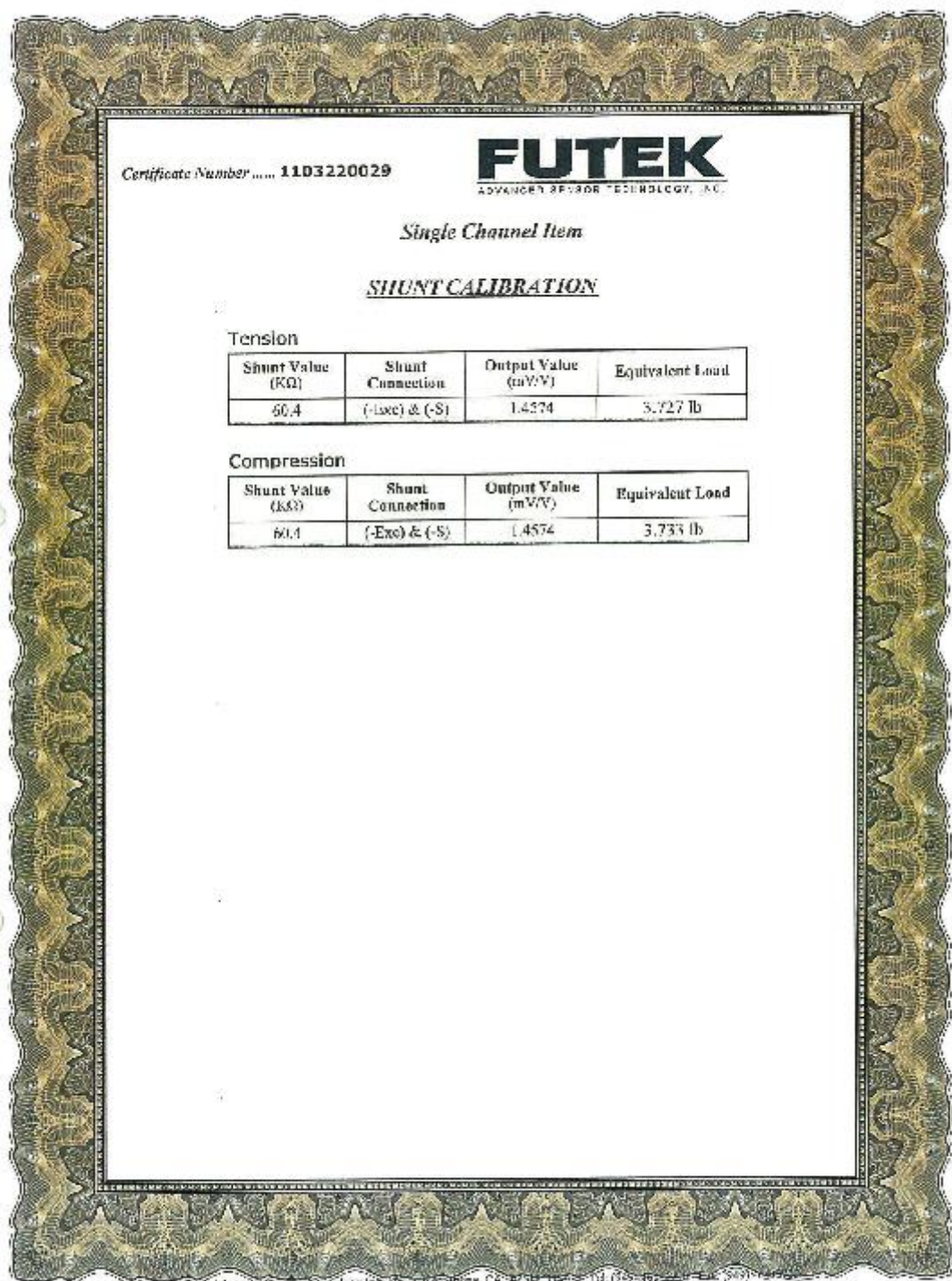
Compression


Load (lb)	Output (mV/V)	Non-Linear Error (% R.O.)
0	0.0000	0.000
1	-0.3909	0.027
2	-0.7816	0.043
3	-1.1717	0.029
4	-1.5621	0.030
5	-1.9519	0.000
0	0.0003	

2045 Advanced Sensor Technology Inc. 10 Yermoland Way, Suite 100, San Jose, CA 95131-1049, USA

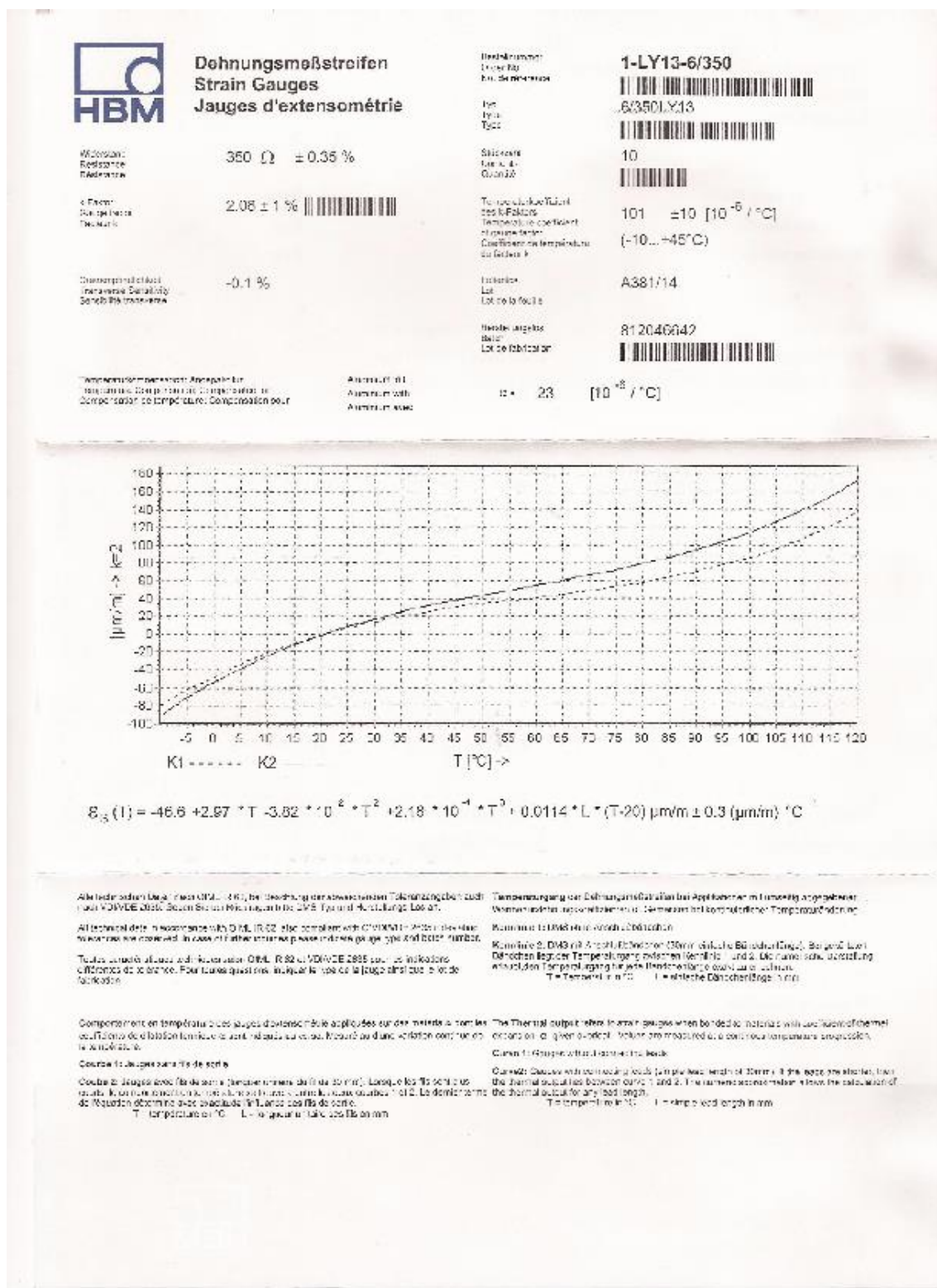
www.futek.com

Page 2 of 3




Certificate of Calibration	
Certificate Number.....	1103220029
 <small>FUTURED SENSOR TECHNOLOGY, INC.</small>	
Sensor Info:	
S/N	371604
Model	1.SB200
Item #	FSH00105
Capacity	5 lb
Description: LS3200, 5 lb, JR 5 Bottom Load Cell, Standard, Material: 2024-T4, M3x0.5-Thread, Overload Protection, 20 Awg 4 Conductor Braid Shielded Silicone Cable, 5 Ft Long, "No Risk 1 Year Limited Warranty"	
Calibration Procedure..... OP1000	
CALIBRATION EQUIPMENT USED	
Digital Multimeter:	
DMM Model: Agilent 34401A, S/N: 0836041931	
Dead Weight(s):	
1- 50 lb, Traceability No: 501660	
This certifies that the following sensor has been calibrated using equipment traceable to NIST supporting documentation relative to accuracy. A copy file and is available for examination on request. This certificate shall not be reproduced except in full without the written approval of FUTEK.	
Calibrated By:	Fernando Aguilera
Shipment Date:	3/23/2011
Re-Calibration Date:	One Year After Shipment Date

Käytettyjen HBM venymäliuskojen tekniset ja valmistuserän tiedot



Käytettyjen HBM vastuskompensointi liuskojen tekniset ja valmistustiedot

			
Folienwiderstand für den Nullpunktgleich Zero point balancing resistor Résistance adaptable d'équilibrage au zéro			
Ohmstärke (Ω) Resistance (Ω)	9 Ω ± 20 %	Bezeichnung Code No. Markierung	1-NA1 6/4,73
Zerobühnenwiderstand (Ω) Adjusted resistance Résistance ajustée	4,73 ± 20 %	Typ Type Typ	NA1 6/4,73
Spannabgleich Adjustment range Tension	2,4 - 1,2 - 0,6 - 0,3 - 0,15 - 0,08	Ohmzahl Resistance Ohmzahl	10
		Ablesung Scale Lecture	A341/22
		Verstärkungsfaktor Gain Facteur de gain	812015257

Futek LSB 200 voima-anturin mittauspöytäkirja

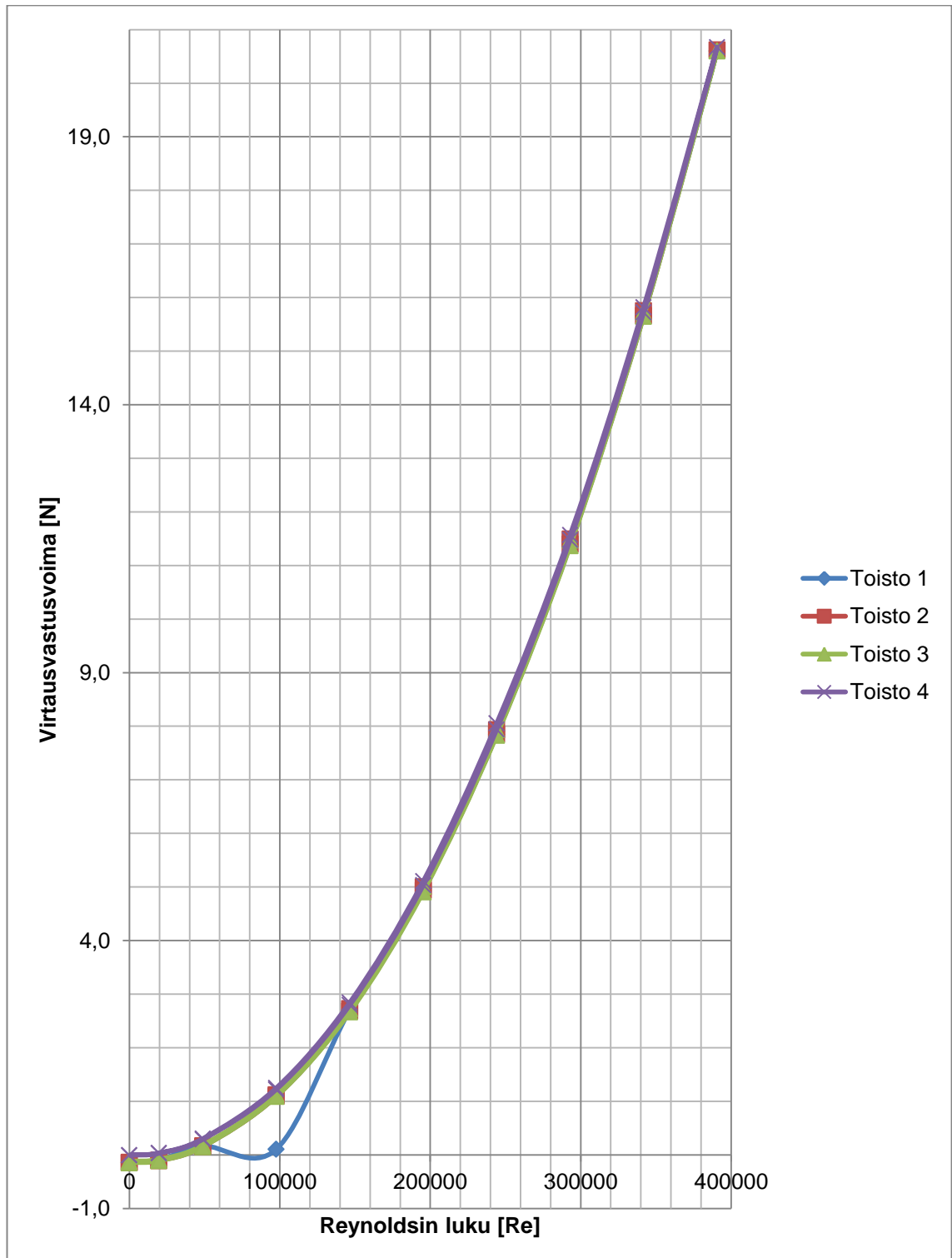
Päivämäärä	10.4.2013			
Aloitusaika	14:47			
Reynoldsin luku				
Wetted perimeter[m]	0,15	m		
Ilman tiheys [kg/m ³]	1,204	kg/m ³		
Viskositeetti	1,85E-05	Pa*s		
Käyttöjännite [V]	10	V		
Mittaussarja 1				
Ilman virtausnopeus	Re	lämpötila	Venymä	Voima
[m/s]	[yksikötön]	[°C]	[μm/m]	[N]
0	0	27,9	-6,10	-0,142
2	19535	28,1	-4,35	-0,102
5	48837	28,0	7,34	0,164
10	97674	28,0	48,68	0,106
15	146512	28,1	118,73	2,705
20	195349	28,3	217,81	4,967
25	244186	28,5	346,88	7,912
30	293023	28,9	502,72	11,444
35	341860	29,3	688,75	15,712
40	390698	30,0	902,75	20,604
35	341860	30,2	686,67	15,663
30	293023	30,1	499,25	11,388
25	244186	30,0	344,03	7,848
20	195349	29,7	216,14	4,928
15	146512	29,3	117,75	2,684
10	97674	29,3	48,20	1,097
5	48837	29,1	7,21	0,161
2	19535	29,1	-4,36	-0,103
0	0	28,9	-5,95	-0,139

Päivämäärä	10.4.2013			
Aloitus	13:37			
Reynoldsin luku				
Wetted perimeter[m]	0,15	m		
Ilman tiheys [kg/m ³]	1,204	kg/m ³		
Viskositeetti	1,85E-05	Pa*s		
Käyttöjännite [V]	10	V		
Mittaussarja 2				
Ilman virtausnopeus	Re	Lämpötila	Venymä	Voima
[m/s]	[yksikötön]	[°C]	[µm/m]	[N]
0	0	25,8	-5,88	-0,137
2	19535	26,2	-4,17	-0,098
5	48837	26,3	7,66	0,172
10	97674	26,3	49,29	1,122
15	146512	26,3	119,73	2,729
20	195349	26,6	219,49	5,005
25	244186	27,0	347,82	7,933
30	293023	27,4	503,81	11,494
35	341860	28,0	690,85	15,755
40	390698	29,4	903,98	20,624
35	341860	29,4	686,36	15,663
30	293023	29,2	499,60	11,397
25	244186	29,1	344,20	7,850
20	195349	28,8	216,32	4,937
15	146512	28,6	117,79	2,685
10	97674	28,4	48,05	1,094
5	48837	28,4	6,98	0,156
2	19535	28,3	-4,49	-0,106
0	0	28,20	-6,12	-0,143

Päivämäärä	11.4.2013			
Aloitusaika	10:30			
Reynoldsin luku				
Wetted perimeter[m]	0,15	m		
Ilman tiheys [kg/m ³]	1,204	kg/m ³		
Viskositeetti	1,85E-05	Pa*s		
Käyttöjännite [V]	10	V		
Mittausarja 3				
Ilman virtausnopeus	Re	Lämpötila	Venymä	Voima
[m/s]	[yksikötön]	[°C]	[μm/m]	[N]
0	0	22,0	-5,10	-0,120
2	19535	21,9	-3,49	-0,083
5	48837	21,6	8,15	0,183
10	97674	21,4	49,66	1,130
15	146512	21,3	119,70	2,728
20	195349	21,4	219,59	5,008
25	244186	21,6	347,90	7,937
30	293023	22,2	503,16	11,472
35	341860	22,8	689,49	15,729
40	390698	23,6	903,06	20,602
35	341860	23,7	685,90	15,648
30	293023	23,7	498,39	11,368
25	244186	23,4	343,30	7,830
20	195349	23,3	215,30	4,910
15	146512	22,9	117,03	2,667
10	97674	22,8	47,87	1,090
5	48837	22,7	6,85	0,153
2	19535	22,6	-4,70	-0,110
0	0	22,30	-6,28	-0,147

Päivämäärä	11.4.2013			
Aloitusaika	14:00			
Reynoldsin luku				
Wetted perimeter [m]	0,15	m		
Ilman tiheys [kg/m ³]	1,204	kg/m ³		
Viskositeetti	1,85E-05	Pa*s		
Käyttöjännite [V]	10	V		
Mittausarja 4				
Ilman virtausnopeus	Re	Lämpötila	Venymä	Voima
[m/s]	[yksikötön]	[°C]	[μm/m]	[N]
0	0	20,3	0,05	-0,002
2	19535	20,6	1,67	0,035
5	48837	20,7	13,43	0,303
10	97674	20,8	54,90	1,249
15	146512	20,9	124,72	2,843
20	195349	21,0	223,89	5,106
25	244186	21,3	352,25	8,054
30	293023	21,7	507,26	11,571
35	341860	22,5	693,36	15,819
40	390698	23,7	906,18	20,674
35	341860	23,8	689,34	15,724
30	293023	23,7	503,15	11,480
25	244186	23,5	348,21	7,942
20	195349	23,2	220,75	5,033
15	146512	22,8	122,81	2,799
10	97674	22,6	53,74	1,223
5	48837	22,3	12,92	0,291
2	19535	22,2	1,40	0,029
0	0	21,70	-0,23	-0,008

Futek LSB200 mitattujen vitsausvastusvoimien yhdistäminen



Kuva 1. Virtausvastusvoimien yhdistäminen.

Prototyyppi voima-anturin kalibrointi mittauspöytäkirja

Ilman virtaus- nopeus	Mittaus 1	Nollaus	Kulma	Y1	Mittaus 2	Nollaus	Kulma	Y1
m/s	µm/m	µm/m	deg	µm/m	µm/m	µm/m	deg	µm/m
0,00	-162,40	0,00			-162,40	0,00		
5,00	-162,20	0,20	-0,10	0,40	-162,60	-0,20	-0,05	-0,10
0,00	-162,60	-0,20			-162,50	-0,10		
0,00	-162,60	0,00			-162,50	0,00		
10,00	-161,40	1,20	0,05	1,10	-161,10	1,40	0,24	0,87
0,00	-162,50	0,10			-162,00	0,50		
0,00	-162,50	0,00			-162,00	0,00		
15,00	-159,60	2,90	0,10	2,69	-158,90	3,10	0,20	2,65
0,00	-162,30	0,20			-161,60	0,40		
0,00	-162,30	0,00			-161,60	0,00		
20,00	-156,30	6,00	0,20	5,49	-154,20	7,40	0,67	4,53
0,00	-161,90	0,40			-160,00	1,60		
0,00	-161,90	0,00			-160,00	0,00		
25,00	-117,20	44,70	0,24	42,88	-112,50	47,50	0,05	47,34
0,00	-161,40	0,50			-159,90	0,10		
0,00	-161,40	0,00			-159,90	0,00		
30,00	-70,90	90,50	0,05	90,29	-67,40	92,50	-0,34	87,97
0,00	-161,30	0,10			-160,60	-0,70		
0,00	-161,30	0,00			-160,60	0,00		
35,00	-24,30	137,00	-0,24	133,39	-21,20	139,40	0,00	139,40
0,00	-161,80	-0,50			-160,60	0,00		
0,00	-161,80	0,00			-160,60	0,00		
40,00	22,50	184,30	0,10	183,19	25,80	186,40	0,05	186,07
0,00	-161,60	0,20			-160,50	0,10		

Mittaus 3	Nollaus	Kulma	Y1	Mittaus 4	Nollaus	Kulma	Y1
µm/m	µm/m	deg	µm/m	µm/m	µm/m	deg	µm/m
-160,50	0,00			-160,10	0,00		
-160,60	-0,10	-0,20	0,29	-159,70	0,40	0,10	0,20
-160,90	-0,40			-159,90	0,20		
-160,90	0,00			-159,90	0,00		
-159,50	1,40	0,15	1,09	-158,70	1,20	0,15	0,89
-160,60	0,30			-159,60	0,30		
-160,60	0,00			-159,60	0,00		
-157,70	2,90	-0,05	3,00	-156,50	3,10	0,20	2,65
-160,70	-0,10			-159,20	0,40		
-160,70	0,00			-159,20	0,00		
-151,70	9,00	0,76	5,15	-149,30	9,90	-0,20	10,10
-158,80	1,90			-159,60	-0,40		
-158,80	0,00			-159,60	0,00		
-109,80	49,00	-0,20	48,44	-106,50	53,10	0,81	35,17
-159,20	-0,40			-157,50	2,10		
-159,20	0,00			-157,50	0,00		
-64,40	94,80	-1,24	32,79	-62,30	95,20	-0,42	87,64
-165,00	-5,80			-158,40	-0,90		
-165,00	0,00			-158,40	0,00		
-17,70	147,30	1,24	46,13	-16,20	142,20	0,24	137,47
-159,20	5,80			-157,90	0,50		
-159,20	0,00			-157,90	0,00		
27,60	186,80	-0,24	181,71	31,60	189,50	-0,70	145,68
-159,70	-0,50			-159,60	-1,70		

Mittaus 5	Nollaus	Kulma	Y1	Keskiarvo	Hajonta
µm/m	µm/m	deg	µm/m	µm/m	%
-159,60	0,00				
-157,00	2,60	0,83	0,27	0,21	0,19
-157,40	2,20				
-157,40	0,00				
-155,80	1,60	0,10	1,39	1,07	0,21
-157,20	0,20				
-157,20	0,00				
-153,60	3,60	0,46	2,33	2,66	0,24
-156,20	1,00				
-156,20	0,00				
-144,50	11,70	0,90	5,75	6,20	2,23
-153,70	2,50				
-153,70	0,00				
-101,40	52,30	0,34	48,70	44,51	5,72
-153,00	0,70				
-153,00	0,00				
-55,70	97,30	0,34	91,18	77,97	25,30
-152,30	0,70				
-152,30	0,00				
-8,50	143,80	0,46	127,72	116,82	39,77
-151,30	1,00				
-151,30	0,00				
38,50	189,80	0,38	175,48	174,43	16,53
-150,50	0,80				

Prototyyppi voima-anturin mittauspöytäkirja

Päivämäärä	4.5.2013			
Aloitus aika	16:30			
Reynoldsin luku				
Wetted perimeter[m]:	0,15	m		
Ilman tiheys [kg/m^3]:	1,204	kg/m^3		
Viskositeetti:	1,85E-05	Pa*s		
Anturi ja mittaus				
Käyttöjännite [V]:	5	V		
Käytetty mittalaite:	HBM MGC AB12, venymäliuska mittaus yksikkö MC55			
Mittaussarja 1				
Ilman virtausnopeus	Re	Lämpötila	Venymä	Voima
[m/s]	[yksikötön]	[°C]	[µm/m]	[N]
0	0	22,9	-149,0	0
5	48837	22,9	-148,5	0,31
10	97674	22,9	-147,2	1,24
15	146512	22,9	-144,8	2,8
20	195349	22,9	-134,9	4,98
25	244186	22,9	-91,5	7,78
30	293023	23,0	-46,8	11,2
35	341860	23,1	-0,5	15,25
40	390698	23,3	45,7	19,91
35	341860	23,2	32,2	15,25
30	293023	23,1	-6,8	11,2
25	244186	22,9	-42,7	7,78
20	195349	22,9	-75,8	4,98
15	146512	22,9	-103,4	2,8
10	97674	22,9	-123,9	1,24
5	48837	22,9	-135,1	0,31
0	0	22,9	-136,3	0

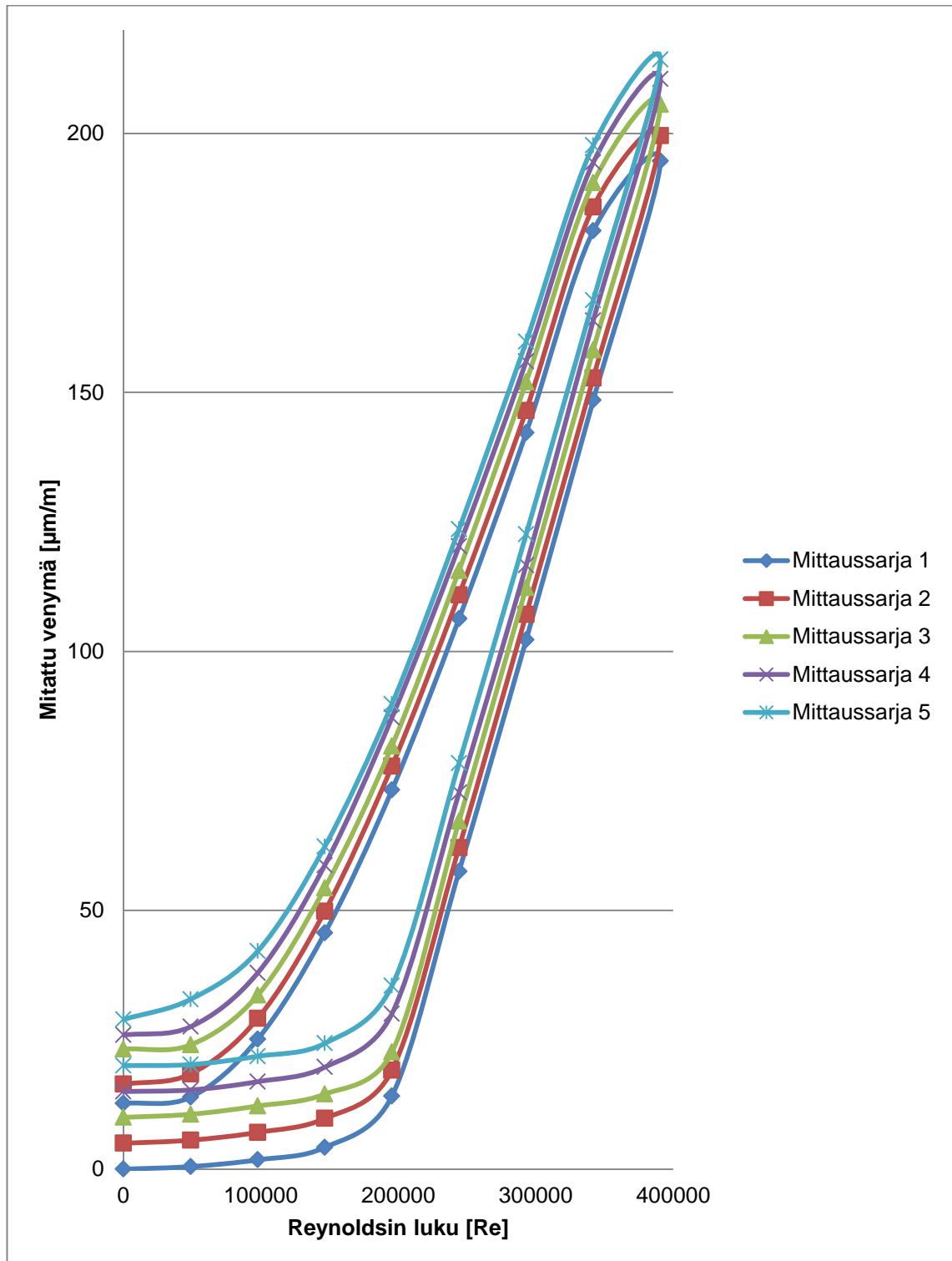
Päivämäärä	4.5.2013			
Aloitus aika	16:42			
Reynoldsin luku				
Wetted perimeter[m]:	0,15	m		
Ilman tiheys [kg/m^3]:	1,204	kg/m^3		
Viskositeetti:	1,85E-05	Pa*s		
Anturi ja mittaus				
Käyttöjännite [V]:	5	V		
Käytetty mittalaite:	HBM MGC AB12, venymäliuska mittaus yksikkö MC55			
Mittaussarja 2				
Ilman virtausnopeus	Re	Lämpötila	Venymä	Voima
[m/s]	[yksikötön]	[°C]	[µm/m]	[N]
0	0	22,9	-136,7	0
5	48837	22,9	-136,1	0,31
10	97674	22,9	-134,6	1,24
15	146512	22,9	-131,9	2,8
20	195349	22,9	-122,6	4,98
25	244186	22,9	-79,6	7,78
30	293023	23,0	-34,6	11,2
35	341860	23,1	11,1	15,25
40	390698	23,3	57,9	19,91
35	341860	23,2	44,1	15,25
30	293023	23,1	4,8	11,2
25	244186	22,9	-30,8	7,78
20	195349	22,9	-63,9	4,98
15	146512	22,9	-91,9	2,8
10	97674	22,9	-112,6	1,24
5	48837	22,9	-123,3	0,31
0	0	22,9	-125,3	0

Päivämäärä	11.4.2013			
Aloitus aika	16:54			
Reynoldsin luku				
Wetted perimeter[m]:	0,15	m		
Ilman tiheys [kg/m^3]:	1,204	kg/m^3		
Viskositeetti:	1,85E-05	Pa*s		
Anturi ja mittaus				
Käyttöjännite [V]:	5	V		
Käytetty mittalaite:	HBM MGC AB12, venymäliuska mittaus yksikkö MC55			
Mittaussarja 3				
Ilman virtausnopeus	Re	Lämpötila	Venymä	Voima
[m/s]	[yksikötön]	[°C]	[µm/m]	[N]
0	0	22,9	-125,9	0
5	48837	22,9	-125,3	0,31
10	97674	22,9	-123,7	1,24
15	146512	22,9	-121,4	2,8
20	195349	22,9	-113,3	4,98
25	244186	22,9	-68,7	7,78
30	293023	23,0	-23,6	11,2
35	341860	23,1	22,3	15,25
40	390698	23,3	69,7	19,91
35	341860	23,2	54,6	15,25
30	293023	23,1	16,1	11,2
25	244186	22,9	-20,3	7,78
20	195349	22,9	-54,2	4,98
15	146512	22,9	-81,6	2,8
10	97674	22,9	-102,3	1,24
5	48837	22,9	-111,9	0,31
0	0	22,9	-112,7	0

Päivämäärä	11.4.2013			
Aloitus aika	17:06			
Reynoldsin luku				
Wetted perimeter[m]:	0,15	m		
Ilman tiheys [kg/m^3]:	1,204	kg/m^3		
Viskositeetti:	1,85E-05	Pa*s		
Anturi ja mittaus				
Käyttöjännite [V]:	5	V		
Käytetty mittalaite:	HBM MGC AB12, venymäliuska mittaus yksikkö MC55			
Mittaussarja 4				
Ilman virtausnopeus	Re	Lämpötila	Venymä	Voima
[m/s]	[yksikötön]	[°C]	[µm/m]	[N]
0	0	22,9	-113,1	0
5	48837	22,9	-112,8	0,31
10	97674	22,9	-111,2	1,24
15	146512	22,9	-108,4	2,8
20	195349	22,9	-98,1	4,98
25	244186	22,9	-55,4	7,78
30	293023	23,0	-11,5	11,2
35	341860	23,1	35,8	15,25
40	390698	23,3	82,4	19,91
35	341860	23,2	66,3	15,25
30	293023	23,1	27,9	11,2
25	244186	22,9	-7,8	7,78
20	195349	22,9	-40,9	4,98
15	146512	22,9	-69,4	2,8
10	97674	22,9	-90,2	1,24
5	48837	22,9	-100,6	0,31
0	0	22,9	-102,2	0

Päivämäärä	11.4.2013			
Aloitus aika	17:18			
Reynoldsin luku				
Wetted perimeter[m]:	0,15	m		
Ilman tiheys [kg/m^3]:	1,204	kg/m^3		
Viskositeetti:	1,85E-05	Pa*s		
Anturi ja mittaus				
Käyttöjännite [V]:	5	V		
Käytetty mittalaite:	HBM MGC AB12, venymäliuska mittaus yksikkö MC55			
Mittaussarja 5				
Ilman virtausnopeus	Re	Lämpötila	Venymä	Voima
[m/s]	[yksikötön]	[°C]	[µm/m]	[N]
0	0	22,9	-103,2	0
5	48837	22,9	-103,0	0,31
10	97674	22,9	-101,4	1,24
15	146512	22,9	-98,9	2,8
20	195349	22,9	-87,8	4,98
25	244186	22,9	-44,8	7,78
30	293023	23,0	-0,6	11,2
35	341860	23,1	44,6	15,25
40	390698	23,3	91,1	19,91
35	341860	23,2	74,5	15,25
30	293023	23,1	36,6	11,2
25	244186	22,9	0,4	7,78
20	195349	22,9	-33,4	4,98
15	146512	22,9	-60,9	2,8
10	97674	22,9	-81,1	1,24
5	48837	22,9	-90,4	0,31
0	0	22,9	-94,3	0

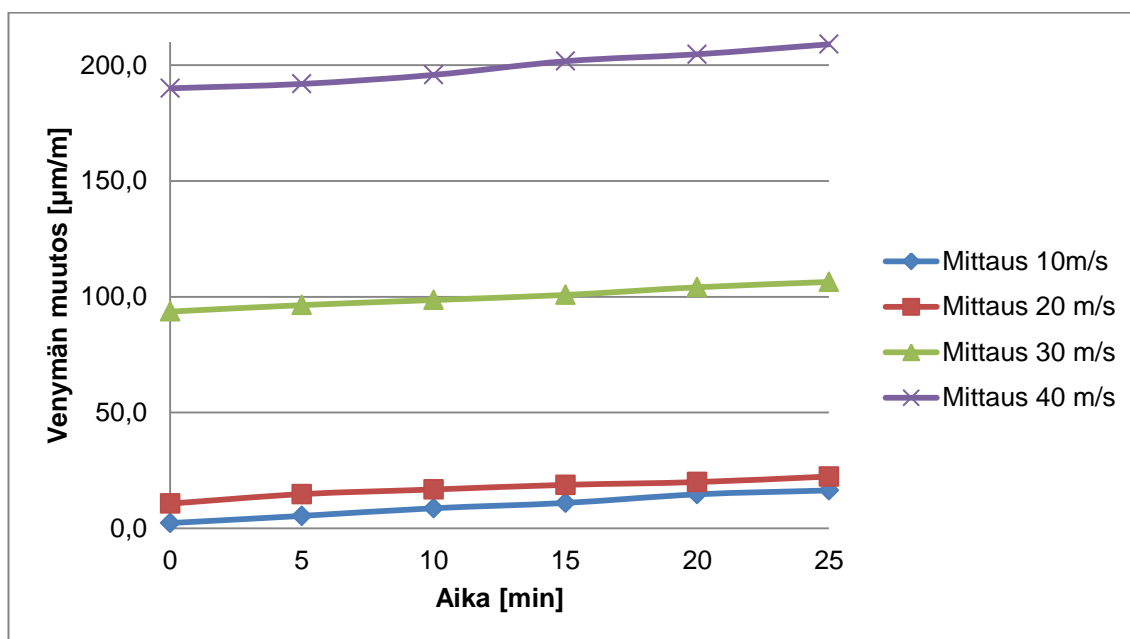
Reynoldsin luku				
Wetted perimeter[m]:	0,15	m		
Ilman tiheys [kg/m^3]:	1,204	kg/m^3		
Viskositeetti:	1,85E-05	Pa*s		
Anturi ja mittaus				
Käyttöjännite [V]:	5	V		
Käytetty mittalaite:	HBM MGC AB12, venymäliuska mittaus yksikkö MC55			
Mittausten keskiarvo				
Ilman virtausnopeus	Minimi	Maksimi	Venymä	Voima
[m/s]	[µm/m]	[µm/m]	[µm/m]	[N]
0	-149,0	-103,2	-125,6	0
5	-148,5	-103,0	-125,1	0,31
10	-147,2	-101,4	-123,6	1,24
15	-144,8	-98,9	-121,1	2,8
20	-134,9	-87,8	-111,3	4,98
25	-91,5	-44,8	-68,0	7,78
30	-46,8	-0,6	-23,4	11,2
35	-0,5	44,6	22,7	15,25
40	45,7	91,1	69,4	19,91
35	32,2	74,5	54,3	15,25
30	-6,8	36,6	15,7	11,2
25	-42,7	0,4	-20,2	7,78
20	-75,8	-33,4	-53,6	4,98
15	-103,4	-60,9	-81,4	2,8
10	-123,9	-81,1	-102	1,24
5	-135,1	-90,4	-112,3	0,31
0	-136,3	-94,3	-114,2	0



Kuva 1. Mitattujen virtausvastusvoimien yhdistäminen. Käyrien lähtöpisteet siirrettiin nollaan, sekä käyrät erotettiin toisistaan näiden käyttäytymisen havainnollistamiseksi.

Nollapisteen siirtyminen ajan funktiona

	Mittaus 1	Mittaus 2	Mittaus 3	Mittaus 4
Virtausnopeus [m/s]	10	20	30	40
Aloitusaika [hh:mm]	17:29	17:55	18:22	18:51
Lämpötila tuulitunneli [°C]	23,30	22,60	22,80	24,10
Lämpötila täydennys [°C]	20,30	20,50	20,50	20,50
Nollakohta [μm/m]	0,00	-80,10	-63,70	-580,60
0min [μm/m]	-93,00	-69,40	29,90	-390,60
+5min [μm/m]	-89,90	-65,30	32,70	-388,70
+10min [μm/m]	-86,60	-63,30	34,90	-348,80
+15min [μm/m]	-84,30	-61,30	37,10	-378,90
+20min [μm/m]	-80,60	-60,10	40,40	-375,90
+25min [μm/m]	-78,90	-57,70	42,70	-371,60
Nollakohta [μm/m]	-80,10	-63,70	-59,10	-569,30
Lämpötila tuulitunneli [°C]	22,60	22,80	24,00	27,40
Lämpötila täydennys [°C]	20,50	20,50	20,50	20,50
Erotus alkupisteet [μm/m]	93,00	10,70	93,60	190,00
Erotus loppupisteet [μm/m]	-1,20	6,00	101,80	197,70
Keskipoikkeama	4,28	3,15	3,78	10,37
Minimi [μm/m]	-93,00	-69,40	29,90	-390,60
Maksimi [μm/m]	-78,90	-57,70	42,70	-348,80



Kuva 2. Nollapisteen siirtyminen ajan funktiona.